

修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科 知能機械工学専攻 博士前期課程		
氏 名	高澤 駿介	学籍番号	1332045
論 文 題 目	超弾性材の座屈現象を用いた人工靱帯機構の開発と 五指ハンドへの応用に関する研究		
<p>要 旨</p> <p>近年、小型かつ多関節を有するロボットハンドの発展が目覚ましく、様々な分野での需要が高まっている一方で、小型化が進むにつれてロボットハンドの強度が低下し、想定しない過負荷や衝撃によって故障してしまうことが問題となっている。特に、負荷がかかる部位である関節の強度低下は著しく、多くのタスクが実現可能で、かつ故障しない関節の開発が進められている。</p> <p>様々な動作やタスクを実現するために、ロボットハンドの関節は負荷に対してリジッドである必要がある。一方で、過負荷や衝撃に対して故障しない関節を実現するためには負荷に対して柔軟である必要がある。したがって多くのタスクを実現することと耐故障性を持たせることはトレードオフの関係となっている。</p> <p>そこで本研究では、1つの関節に関節機能と破壊防止機能の両方の機能を持たせ、負荷の大きさに応じて選択的に動作を変えることで関節を保護することを提案し、リジッドな関節を実現するための靱帯機構と、関節破壊防止のための自動回復機能を有するフォースリミッタ機構の2つを開発した。</p> <p>靱帯機構は、すべり関節の回転中心を通過するように通したワイヤを用いてリンク同士を結合するもので、回転中心によらずにリジッドな関節を実現する。</p> <p>フォースリミッタ機構は超弾性合金の座屈現象を用いた機構で、低負荷時は剛体として、過負荷時には弾性体として作用することで靱帯機構のワイヤに緩みを発生させ、関節の破壊を防ぐ機構である。機構作動後は超弾性効果を用い、除荷によって自動的に機能回復を行う。</p> <p>これらの関節機構を実装した五指型ロボットハンドを開発し、評価実験を行った結果から、本研究の成果として次の2点を得た。</p> <p>I：負荷の大きさに応じて選択的に動作を変え、低負荷時には高い剛性を備えたすべり関節、過負荷時には脱臼して関節を保護し、除荷によって関節機能の回復を行う小型関節機構の実現</p> <p>II：開発した関節機構を実装し、把持能力やタスク実行能力を向上し、耐故障性を獲得させた小型の五指型ロボットハンドの実現</p>			

平成 26 年度 修士論文



超弾性材の座屈現象を用いた
人工靱帯機構の開発と
五指ハンドへの応用に関する研究

主指導教員 横井浩史 教授

指導教員 下条誠 教授

電気通信大学大学院 情報理工学研究科 知能機械工学専攻

学籍番号 1 3 3 2 0 4 5

高澤 駿介

目次

第 1 章. 序論	1
1.1 背景	2
1.2 多関節型ロボットハンドの従来研究・関連研究	3
1.2.1 ヒトの手の形状を模したロボットハンド	3
1.2.2 耐衝撃性の高いロボットハンド	3
1.2.3 関連研究のまとめ	4
1.3 研究目的	5
1.4 本論文の構成	6
第 2 章. 五指型ロボットハンドに適用するための関節機構の要件	7
2.1 はじめに	8
2.2 ロボットハンドにおける物体把持と関節の役割	9
2.2.1 主な物体把持の指姿勢	9
2.2.2 物体把持時の関節への負荷方向と剛性の必要性	10
2.3 関節機構の設計要件	12
2.3.1 形状・サイズの要件	12
2.3.2 関節の剛性の要件	13
2.3.3 耐故障性の要件	13
2.4 関節の種類と方式の決定	14
2.4.1 ピン関節	14
2.4.2 すべり関節	14
2.4.3 伸縮材料で接合した関節	14
2.4.4 ボールアンドソケット関節	15
2.4.5 関節のまとめと駆動方式の決定	15
2.5 おわりに	16

第3章. 関節機構の提案とモデル化.....	17
3.1 はじめに.....	18
3.2 先行研究 すべり軸受け機構.....	19
3.2.1 すべり軸受け機構の概要.....	19
3.2.2 すべり軸受け機構の問題点.....	19
3.2.3 高剛性フォースリミッタ機構の提案.....	20
3.3 関節機構の仕様と概要.....	21
3.4 関節の剛性獲得のための靱帯機構.....	22
3.5 関節破壊防止のためのフォースリミッタ機構.....	24
3.5.1 フォースリミッタ機構に使用する現象の決定.....	24
3.5.2 超弾性合金の座屈を利用したフォースリミッタ機構の概要.....	25
3.6 フォースリミッタ機構のモデル化.....	27
3.6.1 モデルが求められる項目.....	27
3.6.2 金属線の座屈荷重のモデル.....	28
3.6.3 金属線の最大ひずみ量のモデル.....	28
3.6.4 モデル化のまとめ.....	30
3.7 おわりに.....	31
第4章. 五指ハンドへの応用.....	33
4.1 はじめに.....	34
4.2 関節機構のパラメータ決定.....	35
4.3 試作機の製作.....	36
4.3.1 3DCAD による設計.....	36
4.3.2 試作機の組み立て.....	36
4.4 試作機による機構の動作.....	38
4.4.1 低負荷時の関節機構の動作.....	38
4.4.2 高負荷時の関節機構の動作.....	38
4.4.3 除荷による関節機構の自動回復の動作.....	39
4.5 五指型ロボットハンドへの実装.....	40
4.5.1 関節機構の実装方法.....	40
4.5.2 3DCAD による設計.....	40
4.6 五指型ロボットハンドの制作.....	41
4.6.1 五指型ロボットハンドの制作.....	41

4.6.2 五指型ロボットハンドの制御方法	42
4.7 おわりに	43
第5章. 関節機構の性能評価	45
5.1 はじめに	46
5.2 フォースリミッタ機構が発動する時の荷重の測定	47
5.2.1 実験内容	47
5.2.2 実験結果	47
5.2.3 考察	48
5.3 多様な物体における把持能力試験	49
5.3.1 実験内容	49
5.3.2 実験結果	50
5.3.3 考察	54
5.4 ピック&プレイス実験	55
5.4.1 実験内容	55
5.4.2 実験結果	56
5.4.3 考察	57
5.5 タスク実行実験	59
5.5.1 実験内容	59
5.5.2 実験結果	59
5.5.3 考察	62
5.6 関節機構性能評価のまとめと考察	63
5.7 おわりに	64
第6章. 結論	65
6.1 結論	66
6.2 今後の展望	67
参考文献	69
謝辞	75
研究業績	77

付録	79
付録 A 五指型ロボットハンド設計図	80

第1章 序論

1.1 背景.....	2
1.2 多関節型ロボットハンドの従来研究・関連研究	3
1.2.1 ヒトの手の形状を模したロボットハンド	3
1.2.2 耐衝撃性の高いロボットハンド	3
1.2.3 関連研究のまとめ	4
1.3 研究目的.....	5
1.4 本論文の構成.....	6

1.1 背景

近年、多くの関節自由度を持つロボットハンドの発展は目覚ましく、産業用や医療用など様々な分野でロボットハンドが使用されており、それに従い小型で軽量のロボットハンドの需要が大きくなっている。中でもヒトを模したヒューマノイド[kaneko 2009]や電動義手[TouchBionics 2012]をはじめとし、ヒトの手の巧みさに着目したロボットハンド[SQUSE 2011]や福祉ロボット[Hirose 2013]など、ヒトの手大の多関節ロボットハンドの需要が大きくなっており、世界各地で実用に向けて研究・開発がなされている。

ヒトの手を模したロボットハンドが機構的に備えるべき要件は主にサイズ、重量、形状、自由度、出力の 5 項目が挙げられる。これらの要件は使用用途によって違いはあるが大枠として下記のようになる。

- ・サイズ : ヒトの手と同じ大きさもしくはヒトの手と同じ寸法比率
- ・重量 : アームへの負荷低減のため、可能な限り計量
- ・形状 : 母指とそれに対向する 4 本の指の計 5 本
- ・自由度 : ヒトが行う多様な動作を実現するために必要な自由度
- ・出力 : 対象物体の移動、アプリケーションを遂行するのに必要な出力

上記の要件を実現するために様々な分野で開発がなされているが、小型のロボットハンドであることと高負荷に耐えうる強度を備えることはトレードオフの関係にあり、ロボットハンドが破損してしまうことが問題となっている。

まず、ロボットハンドの部品の中で特に負荷がかかりやすく、壊れやすい部品はモータ主軸および動力を伝達する歯車等伝達部品と、関節周りの骨格とその関節軸となるピンである。モータ主軸や歯車に関しては、トルクリミッタの挿入や動力伝達方法の工夫で回避できるが、関節や軸のピンは位置、サイズ共に制限されており強度の獲得は困難である。

加えて多関節型のロボットハンドになるにつれて、関節の個数が増大し、関節周りには動力伝達の部品を挿入するため、関節の部品が小さくなり、より一層の強度の低下を引き起こしている。また、関節軸に用いられるピン周りには、状況により部分的に 1GPa を超える応力がかかる場合もあり、高強度材を用いての強度の向上も不可能である。

そのため、ヒトのいる環境内などで使用され、想定外の外力に対応可能な小型関節機構の開発が進められている[日本ロボット学会 2013][小川 2005]。

以上の事から、サイズ、重量、形状、自由度、出力全ての項目において要求を満たし、且つ高い強度、耐久性を備えたロボットハンドを実現するためには、想定外の負荷や衝撃に対して、ロボットハンドが破損しないような、軽量で小型の関節機構が必要である。

1.2 多関節型ロボットハンドの従来研究・関連研究

ヒトの手大の小型・軽量ロボットハンドはヒトと同等の運動自由度を持たせることや、高い負荷や衝撃に対して耐えることを目指して開発されている。

本節では、ヒトの手と同等の巧みさを獲得することを目指したロボットハンドとその関節機構、耐衝撃性などを考慮して故障しないロボットハンドを目指したものをまとめ、手先の軽量化や小型化、耐故障性の獲得が引き起こす問題について示す。

1.2.1 ヒトの手の形状を模したロボットハンド

ヒトの手の形状や動作を模倣し、多様な動作の実現を目指して開発されたロボットハンドとして、まず Yoky Matsuoka らによって開発された ACT Hand が挙げられる。このロボットハンドは、3D スキャナ等を利用してヒトの手の骨格・関節構造・腱などの形状や配置を計測し、腱に見立てたワイヤを用いて手の構造を模倣したロボットハンドであり、ヒトの手で行う多様な把持形態を実現している[Ashish 2013]。また、株式会社ダイニチが開発している Gifu hand は、手指の中に搭載可能な小型モータを使用し減速比を高くすることで小型・軽量かつ高出力を実現している[Mouri 2002]。しかしこれらのハンドの関節部は、ハンドの大型化を防ぐために直径 1～4mm 程度の小型のピンが使用されており、関節部の強度が著しく低いという問題がある。電動義手として商品化され、世界各地で使用されている ottobock 社の michelangelo では自由度を削減することで軽量・小型でかつ日常生活の使用に耐えうる強度を持ち合わせている[Ottobock 2012]。しかし、運動自由度が 3 であるために巧みなヒトの手の動作すべて再現するようなどころには至らない。

1.2.2 耐衝撃性の高いロボットハンド

様々な状況下で使用され、高負荷、強い衝撃に耐えられるロボットハンドは、軍事や工場内のマテリアルハンドリングをはじめとし、各地で研究されている。DLR hand II は、ヒトの手大でありながら指先をハンマーで打ちつけられても破損しない強度を持ち合わせたハンドである[DLR 2011]。このハンドは駆動法にワイヤ駆動を使用しており、モータと関節を繋ぐワイヤにバネを設置することによって衝撃が来た時には指が関節方向に逃げ、破損することを防いでいる。しかし、牽引ワイヤにバネを繋いでいるため、大型の牽引機構を有するにもかかわらず、指先力が 30N ほどしかなく大型の物体の把持はできない。また、iRobot 社が開発した iRobotHand や Aaron らが開発したロボットハンドは、各指節を弾性体で接続し、ワイヤ牽引によって駆動を行う関節機構である[iRobot 2012][Raymond 2013]。これらの関節は 20mm ほどの太さでありながら、スイングしたバットをハンド部に直撃させても破損しない。また物体を握りこむように関節が動くため、重量物を持ち上げることも可能である。しかし関節として弾性体を使用するため弾性体は柔らかい素材でなければならない、指先や指の間で物体を把持する際には指の形状が安定せず物体把持が困難であるという問題がある。

1.2.3 関連研究のまとめ

これまでに多様な把持が可能でかつ強度の高いロボットハンドは数多く開発されてきた。多様な把持が行えて且つ高出力を実現するロボットハンドは関節の剛性を高めることであらゆる方向の負荷に対して指形状が安定しており、物体把持時にも指形状が安定し把持が安定する。しかし関節部に小型の部品を使用するため強度が低いことが問題になっている。一方で、強度の高いロボットハンドは弾性体を使用するものが一般で、弾性体の柔らかさを利用して衝撃や負荷に対して非常に強固な作りとなっているが、把持の安定性や出力が低くなることが問題となっている。

1.3 研究目的

これまでに、ヒトの手の巧みさを目指したロボットハンドや高い耐衝撃性を実現するためのロボットハンドは数多く開発されてきたが、多様な把持形態を安定して行えるような、小型で高い強度を有するロボットハンドはいまだ存在しない。

特にマテリアルハンドリングのような多様な物体の把持を行うには関節の剛性が必要であり、かつ高い負荷に耐えるには過負荷に応じて負荷を分散するメカニズムを、タスク実現時に必要な関節の剛性を損なわずに導入する必要がある。

そこで本研究では、

耐久性を備えかつ多様な把持やタスクを実現可能なロボットハンドを目指し、

その実現のために高い耐久性と関節の剛性を備えた小型・軽量な関節機構を開発することを目的とする。

本論文では関節部にかかる負荷の大きさに応じて選択的に動作を変え、一定の負荷より小さいときは剛性を持つ関節であり、高負荷時にはフォースリミッタが働いて関節の破壊防止を試みる関節機構を新たに提案し、関節機構の機能および実装したロボットハンドの性能について述べ、関節機構が及ぼす影響について述べる。

1.4 本論文の構成

本章では，研究背景と目的を示した．

第2章では，ロボットハンドに使用する関節を開発するための問題設定を行い，設計要件をまとめる．

第3章では，剛性を備え，且つ破壊を防止する関節のための新機構を提案し，パラメータ決定のためモデルを立て，その説明を行う．

第4章では，関節機構の各パラメータを決定し，試作機を通じた機能実現の検証と，関節機構の五指型ロボットハンドへの実装についてまとめる．

第5章では，制作した関節機構や五指型ロボットハンドが実現する機能について評価を行う．

第6章では，本論文のまとめと今後の展望を示す．

第2章 五指型ロボットハンドに適用 するための関節機構の要件

2.1 はじめに.....	8
2.2 ロボットハンドにおける物体把持と関節の役割	9
2.2.1 主な物体把持の指姿勢	9
2.2.2 物体把持時の関節への負荷方向と剛性の必要性	10
2.3 関節機構の設計要件	12
2.3.1 形状・サイズの要件	12
2.3.2 関節の剛性の要件	13
2.3.3 耐故障性の要件	13
2.4 関節の種類と方式の決定	14
2.4.1 ピン関節	14
2.4.2 すべり関節	14
2.4.3 伸縮材料で接合した関節	14
2.4.4 ボールアンドソケット関節	15
2.4.5 関節のまとめと駆動方式の決定	15
2.5 おわりに	16

2.1 はじめに

本章では，ロボットハンドに使用する関節を開発する際の課題を示し，その問題設定を行う．

2.2 節では，ロボットハンドが行う把持と関節にかかる負荷の方向についてまとめ，それを実現するために必要な関節の剛性についてまとめる．

2.3 節では，小型ロボットハンドの関節を設計するに当たり，考慮しなければならない点を設計要件としてまとめる．

2.4 節では，ロボットハンドで主に使用される関節の種類とその特徴について述べ，開発する関節機構で使用する関節を決定する．

2.2 ロボットハンドにおける物体把持と関節の役割

ロボットハンドには様々な形状のものがあり、それぞれマテリアルハンドリングや機械や工具の操作、ジェスチャー表現など様々な用途で使用されている。数ある動作の中で主要な動作として挙げられるのは把持動作であり、ほとんどのロボットハンドが共通して行っている動作である。

本節では、ロボットハンドで行う主な把持動作について述べ、それぞれの把持動作を行う際に関節にかかる負荷と安定把持を実現するために必要な関節の剛性について述べる。

2.2.1 主な物体把持の指姿勢

目的や用途によってロボットハンドの形状は大きく異なり、それぞれ異なった物体の把持方法を行っているが、ロボットハンドの把持方法はだまかに下記の4種類に大別できる。

- ・握り : 掌と指すべてを使い、物体を包み込む姿勢(Fig.2.1(a))
- ・摘み : 指腹や指尖を用い、小物体等を摘み上げる姿勢(Fig.2.1(b))
- ・引掛け : 指をフック状に曲げ、細いもの等を引掛ける姿勢(Fig.2.1(c))
- ・載せる : 掌と指を開いて上に向け、掌や手全体に物体を載せる姿勢(Fig.2.1(d))

握り動作は主に手と同じくらいの大きさの物体や重くて細長い物体を安定して把持する際に使用される。この把持姿勢は物体全体を手や指で包み込むため安定性が高い。また、全ての指を使用して握りこむことが出来るため、重量物体などの運搬が得意である。一方で、ロボットハンドの掌部に対して小さすぎる物体や大きすぎる物体では把持の安定性は著しく低くなり、あまり使用されない。

摘み動作はロボットハンドの大きさに対して小さい物体や細い物体、重量の小さい物体を把持する際に使用されることが多い。この把持姿勢は指先を使用し、ハンドによっては一部の指で行う動作であるため出力が小さくなる。一方で、ピック&プレイスなどの細かい作業を行うことに適している。

引掛け動作は物体に持ち手があり且つその重心が持ち手より小さいときや、複数の手で大きな物体を把持する際などに使用される。この把持姿勢は重力方向の荷重に対して安定して物体を運ぶことができ、重量物体の運搬が可能である。また、複数のハンドをすることで、ハンドより大型な物体のピック&プレイスを正確に行うことが可能である。

載せる動作は、載せ方次第で小物体から大物体まで安定して運搬することができ、運搬可能な重量はアーム部の出力の依存する把持姿勢である。また、これらの把持の中では最も受け取りを得意としている把持姿勢であり、そのまま握りに遷移することもある。その一方で、側面からの力に安定性が低く、高速での運搬が出来ない。



(a) 握り動作



(b) 摘み動作



(c) 引掛け動作



(d) 載せる動作

Fig.2.1 ロボットハンドで行われる把持動作

2.2.2 物体把持時の関節への負荷方向と剛性の必要性

ロボットハンドの関節が Fig.2.2(a)のように x 軸周りに回転するとしたときに、荷重として考えられる力の方向は Fig.2.2(b)のように xyz 軸方向の応力と、それぞれの軸周りのねじりモーメントが考えられる。ロボットハンドでは一般に関節部に物体が接触するような把持は行われないため、関節部にかかる負荷のほとんどは xyz 軸周りのねじりモーメントである。本稿では駆動トルクと同じ方向である x 軸周りのねじりモーメントは除き、 y 軸 z 軸周りのねじりモーメントについて記述する。

関節部にかかるねじりモーメントは、指姿勢と物体の接触部にかかる荷重の方向に大きく影響を受け、指姿勢と接触部の荷重の方向はロボットハンドの把持姿勢と運動方向で大まかに決定される。

握りや引掛けの動作は物体を包み込むため、物体と指の接触面は、指腹と正対する。そのため x 軸周りのねじりモーメントが非常に大きくかかり、 y 軸 z 軸周りのモーメントは x 軸に対して小さい。また物体を指で包み込んでいるため、 y 軸 z 軸周りの関節の剛性が低い場合は物体になじむ形状にハンドが変形し、より把持の安定性を向上させる。

その一方で摘み動作では物体を指腹などでつまむために指が伸びており、握りなどに比べてモーメントアームが大きい。加えて物体と指の接触面が指腹に正対することも少ないため、 y 軸 z

軸周りのねじりモーメントが無視できないほど大きい。従って y 軸 z 軸周りの関節の剛性が低い場合は指が変形してしまい安定した物体把持が行えない。

載せる動作は、静止している状態では物体と指の接触面は指腹と正対するため安定した把持が可能である。しかし指が伸びているためモーメントアームは大きく、ハンドの移動によって無視できない大きさの y 軸 z 軸周りのねじりモーメントが関節に発生する。そのため y 軸 z 軸周りの剛性が低いと、ハンドが移動を始めた瞬間に安定状態から不安定状態に移行し、物体が落下してしまい把持が行えない。

従って、多関節型のロボットハンドで様々な把持姿勢を行わせ、安定してタスクの遂行を行うためには、 y 軸 z 軸周りの剛性が高い関節を備える必要がある。

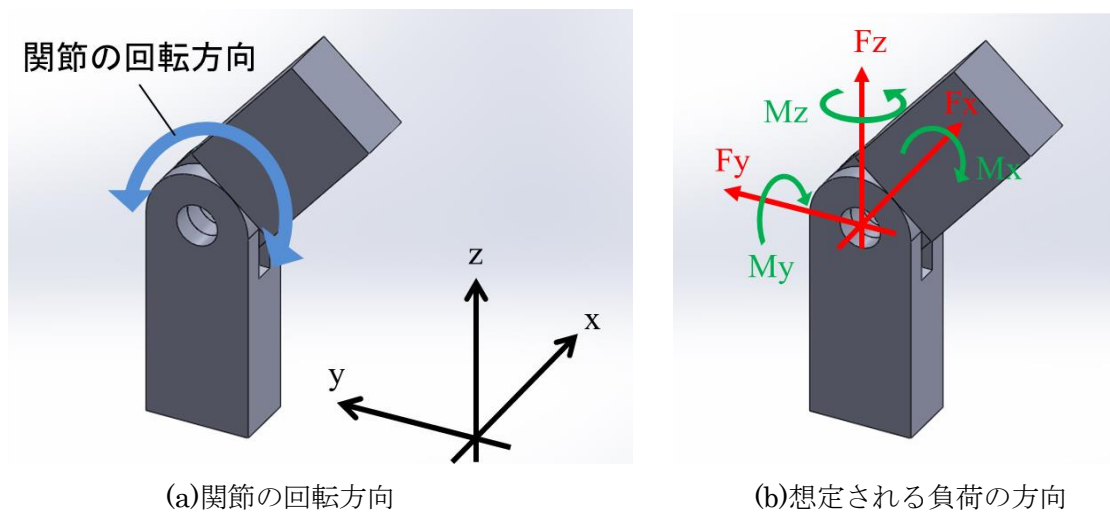


Fig.2.2 関節例と負荷の方向

2.3 関節機構の設計要件

本節では，ヒトの手の形状を模した五指型で，かつヒトの手大のロボットハンドに搭載するための関節機構を設計するときに考慮すべき設計要件についてまとめる．2.3.1 項では，ヒトの手大のロボットハンドに乗せるための関節の形状や位置における要件について述べ，2.3.2，2.3.3 項では，関節機構が備えなければならない剛性や耐久性について述べる．

2.3.1 形状・サイズの要件

ヒトの手の形状を模するために，指の形状や関節の位置はヒトの手とほぼ同様である必要がある．そのため，関節機構はそれぞれヒトと同様の位置に関節を配置する必要がある，加えて指形状を模するために関節外部に突起などの発生させることはできない．

本研究では，関節機構が関節の配置に影響を与えず，ヒトと同様の位置に配置可能であることと，関節機構全体を指や掌に内包可能であることを形状における拘束条件とした．

また，Fig.2.3 のようなヒトの手大のエラストマー樹脂製の装飾用グローブ[矢吹 2014]内に内包し，指や掌の弾力や人に似た外観を獲得する．そのため，ロボットハンドが装飾用グローブに内包できることをサイズにおける拘束条件とした．

本研究で使用する，装飾用グローブはヒトの手で型を取って制作されているため，[河内 2012]のデータを用い，グローブの厚みを考慮してヒトの手より関節機構が小型である必要がある．そこで関節機構のサイズ要件を Table 2.1 にまとめた．



Fig.2.3 エラストマー樹脂製の装飾用グローブ

Table 2.1 関節機構のサイズ要件

部位	値
指のサイズ上限(幅×厚み)[mm]	12×13 以下
関節機構のサイズ上限(幅×高さ×厚み)[mm]	67×69×19 以下
関節機構の掌内部専有面積[mm ³]	87000 以下

2.3.2 関節の剛性の要件

関節が柔軟に弾性変形を行うと物体の把持や操作を行うときに振動してしまい、安定した動作が困難である。加えて関節の駆動方向でなければ振動の抑制なども行えない。従って、安定した動作を実現するためには関節部にかかる負荷に対し想定した負荷の範囲である時はリジッドな状態であることが求められる。

本研究では、関節部に y 軸 z 軸周りにある一定の値より小さな負荷がかかるときにリジッドな動作を行うことを必要条件とし、ヒトが日常生活で使用する物体の把持やタスクの遂行において、十分な剛性を持つことを要件とした。その目標値は、関節側面に大きく負荷のかかる動作である鍵あけ動作でかかるトルクである $160\text{N} \cdot \text{mm}$ とした。

2.3.3 耐故障性の要件

ヒトの介在する環境などで動作させるロボットハンドには、物体との衝突や許容を越えた物体の把持など、予期せぬ衝撃や過負荷がロボットハンドに生じることがある。これらの状況においてロボットハンドが故障することは許されず、機能を維持しなければならない。

そこで本研究では、関節部に降伏応力を超える負荷をかけた際に関節機構が破壊されず、関節の機能を損なわないことを要件とした。

2.4 関節の種類と方式の決定

新規の関節機構を提案するにあたり、開発する関節の方式を決定する必要がある。本節ではロボットに使用される代表的な関節について述べ、その特徴から関節部の形状と駆動方式を決定する。

2.4.1 ピン関節

ピン関節とは一般的なロボットに使用されているような回転中心に軸となるようなピンの入った関節である。この関節の利点は以下のようなものが挙げられる。

- ・単純な機構である程度の強度が得られる。
- ・y 軸 z 軸の周りのねじりモーメントに対して剛性が非常に高い。
- ・ピンにモータを組み込むことで、関節に直接駆動トルクを発生できる。
- ・回転角センサなどの各センサが容易に組み込める。
- ・無限回転する関節などが容易に作成できる。

しかし、関節の強度がピンの軸径の 4 乗の値に依存しており、小型ロボットハンドの指関節のように特に小型の関節においては強度が著しく低下してしまい、小型化と強度の両立が非常に困難であるという欠点がある。

2.4.2 すべり関節

すべり関節とはワイヤなどで結合されたリンク同士の境目が摺動面となり、摺動面が滑ることによって回転運動を行う関節で、ヒトの関節が例として挙げられる。この関節の利点は以下のようなものが挙げられる。

- ・負荷に対して面で受けるため、小型でもある程度強度が得られる。
- ・摺動面の形状を工夫することで、1 関節 2 自由度、3 自由度が得られる。
- ・結合方法によって、関節の剛性をある程度自由に決定できる。
- ・リンク結合部に機能追加のための機構の追加が容易である。

この関節は、リンク同士をワイヤなどで接続する必要があり関節を構成するための部品点数が多くなることや、面が大きくなるにつれて摺動抵抗が大きくなること、原理上可動域が制限されるという欠点がある。

2.4.3 伸縮材料で接合した関節

この関節は、リンクとリンクをバネやゴムなどの柔軟な弾性材で結合した関節で、弾性体を外力によって曲げることでリンクを回転させるもので、[Raymond 2013]などで使用されている。この関節の利点は以下のようなものが挙げられる。

- ・指が柔軟に変形して負荷を分散するため、過負荷や衝撃に強い。
- ・握り動作では物体を包み込むように変形し、高い把持力が得られる。
- ・関節の自由度が高く、関節を伸ばす、ねじるなどの動作も可能。

一方で、広い可動域を弾性体で得るためには柔軟な素材を使用しなければならないため、関節を引っ張る荷重に対して強度が著しく低く、加えて全方向の負荷に対して関節の剛性が低くなるという欠点がある。従って、物体の操作などを行うためのロボットハンドには不向きである。

2.4.4 ボールアンドソケット関節

この関節はすべり関節の一種で、先端に球体がついたリンクとその球体を沿うようなソケットを持つリンクで構成された関節で、例としてヒトの肩関節や股関節が挙げられる。この関節の利点は下記のようなものが挙げられる。

- ・1関節で3自由度の自由度が得られる。
- ・ボールとソケットの間にベアリングを入れることで、摺動抵抗が小さくできる。

しかし、ソケットが球体に比べ小さいと部品点数が増加して機構が複雑になり、ソケットが大きいとソケットがリンクの動作を阻害し、可動域が狭くなるという欠点がある。また、自由度が高く結合部が球体であるため駆動トルクの伝達や制御が難しく、関節の剛性も低くなりがちである。

2.4.5 関節のまとめと駆動方式の決定

多様な物体の把持や操作を行うためには、ロボットハンドに使用する関節には高い剛性が必要である。従って使用する関節としてふさわしいものは、ピン関節かすべり関節であることがわかる。しかし、本研究で開発するロボットハンドはヒトの手大の小型ロボットハンドであるためピン関節では強度が足りない。また、リンク同士をピンで結合するという性質上、剛性を保ったままフォースリミッタなどの機構を組み込んで負荷を分散させる仕組みを導入することは困難である。一方すべり関節は、リンクを結合するワイヤの素材や張力を調整することで剛性が可変であることに加え、リンク同士の結合部に機構を組み込むことが容易で、負荷分散のための機構を導入する余地がある。

また小型・軽量かつ高出力なハンド部を実現するためには、モータをハンド部に内蔵せずワイヤを通じてハンドの外部から動力伝達を行うワイヤ駆動を用いることが一般的である。ワイヤ駆動はリンク部を直接牽引して駆動させる方式であることから、回転関節であれば関節の形状や方式における制限はない。

以上の事から、関節は剛性の獲得が可能でかつ機構の組み込みによって機能の追加が可能なすべり関節を、駆動トルクの伝達方はワイヤ駆動を採用する。

2.5 おわりに

本章では，ロボットハンドで把持を行うときに必要な関節の機能を基に満たさなければならない設計要件をまとめ，関節の種類と駆動方式を決定した．

2.2 節では，ロボットハンドで一般的に行われる把持についてまとめ，それぞれの把持動作の可否と関節の剛性との関係性を述べた．

2.3 節では，小型ロボットハンドの関節として実装するために，サイズ・形状・剛性・耐久性における満たさなければならない条件についてまとめた．

2.4 節では，一般的に使用される関節の種類とそれぞれの特徴について述べ，本研究で想定した条件を基に，関節の種類をすべり関節，駆動方式をワイヤ駆動と決定した．

第3章 関節機構の提案とモデル化

3.1 はじめに	18
3.2 先行研究 すべり軸受け機構	19
3.2.1 すべり軸受け機構の概要	19
3.2.2 すべり軸受け機構の問題点	19
3.2.3 高剛性フォースリミッタ機構の提案	20
3.3 関節機構の仕様と概要	21
3.4 関節の剛性獲得のための靱帯機構	22
3.5 関節破壊防止のためのフォースリミッタ機構	24
3.5.1 フォースリミッタ機構に使用する現象の決定	24
3.5.2 超弾性合金の座屈を利用したフォースリミッタ機構の概要	25
3.6 フォースリミッタ機構のモデル化	27
3.6.1 モデルが求められる項目	27
3.6.2 金属線の座屈荷重のモデル	28
3.6.3 金属線の最大ひずみ量のモデル	28
3.6.4 モデル化のまとめ	30
3.7 おわりに	31

3.1 はじめに

本章では，先行研究での問題点の解決法を提案し，前章までの述べた要件を基に開発した新規関節機構についてまとめる．

3.2 節では，剛性と耐故障性を実現した先行研究のすべり軸受け機構について説明し，問題点と解決法を提案する．

3.3 節では，本研究で開発する新規機構に備える機能についてまとめ，開発する機構の仕様を決定する．

3.4 節では，関節の剛性を獲得するための靱帯機構の概要を説明し，実現する機能と動作について述べる．

3.5 節では，フォースリミッタ機構に使用する現象を決定し，靱帯機構に適用可能なフォースリミッタ機構の概要を説明し，実現する機能と動作について述べる．

3.6 節では，フォースリミッタ機能発動時の負荷と発動時の機構形状についてモデル化を行う．

3.2 先行研究 すべり軸受け機構

小型のロボットハンドのために開発され、ある程度の剛性と耐故障性の両方を獲得するようなすべり関節は既に存在する[参考文献]．本節ではそのすべり軸受け機構の概要と機構の問題点の説明および問題解決法の提案を行う．

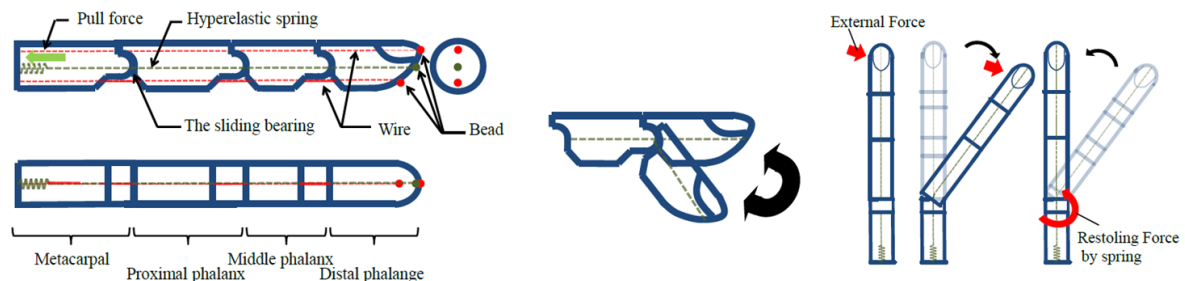
3.2.1 すべり軸受け機構の概要

すべり軸受け機構の概要図を Fig.3.1 に示す．この機構は Fig.3.1(a)のようにリンクの中心部を貫通する穴にワイヤを通し、そのワイヤの片端に小型のスプリングを取り付けて結合したものである．これらの部品全てをリンクに内包することで小型化を実現したすべり関節である．このスプリングによって関節の剛性獲得と、耐久性の獲得を行っている．

まず、常時ワイヤに張力が働くようにスプリングを設置し、摺動面に圧縮応力を発生させており、リンクに負荷がかかった場合でも、圧縮応力を下回る負荷であれば、関節の形状は変化せず、リジッドな状態を維持することが可能である．

一方で、リンクに過大な負荷がかかった場合はスプリングが伸長し、関節がディスロケーションして関節を一時的に破壊することで負荷を分散し、致命的な損傷を回避する(Fig.3.1(b))．また関節が脱臼したとき、リンクにかかる負荷を除荷するとスプリングの引張力で関節形状が自動的に回復し、再びすべり関節として機能を復帰している．

このように関節機能と破壊防止機能の優先度を負荷に応じて変えることで、剛性を持ちかつ耐故障性の高い関節を実現している．



(a)すべり軸受け機構の概要

(b)過負荷時の脱臼動作

Fig.3.1 すべり軸受け機構[田中 2012]

3.2.2 すべり軸受け機構の問題点

この機構の問題点は主に次の 2 つが挙げられる．1 つは小型のロボットハンドであることから使用するスプリングも小径となり十分に高い弾性係数と伸び率を持つものが存在しない．関節破壊防止のために伸び率の高いスプリングを使用しなければならず、結果的に得られる関節の剛性も低くなることである．2 つ目は部品の挿入や組み立てのためにリンクの内部に大きく空洞を作る必要があるため、強度が低下しリンク部の破損を引き起こしてしまう．また、剛性と伸び率が大きい大径スプリングを使用するほどリンクの強度が低下してしまうというトレードオフの問題がある．

3.2.3 高剛性フォースリミッタ機構の提案

前項では先行研究で開発された機構の問題点として、関節の剛性が低くなることとリンク部の強度が低下することの2点を挙げた。この項ではそれぞれの解決法を提案する。

まず、リンク部の強度の低下においては、耐故障性を獲得するための機構を指の外部に設置し、掌の内部に収めることを提案する。一般的にロボットハンドには指を設置するための板のように掌に似た役割を持つ部位が存在する。加えてワイヤ駆動のロボットハンドである場合、掌は指の配置場所とワイヤ経路を確保すれば十分であることから、リンク内部に比べて機構などを組み込むための空間が確保しやすい。そこで先行研究では指内部に収めていた破壊防止及び自動回復機構をより広い領域が確保可能な掌部に移動させ、リンク本体はリンク結合用のワイヤ経路以外を中実に制作可能にすることを提案する。

次に剛性獲得のための機構は、高い弾性係数や伸び率獲得のために大型化しやすいスプリングから、磁石の引力を例とする低負荷時は剛体で高負荷時には破断に似た変位を行い、かつ回復が容易なフォースリミッタ機構の開発を提案する。低負荷時は剛体であるため、摺動面の圧縮応力発生のためのスプリングを伸長させる空間は不要になり、高負荷時は機構の変形によって関節の破損が防止可能である。

3.3 関節機構の仕様と概要

2 章までに一般的なロボットハンドの関節に必要な機能について述べてそれぞれの要件をまとめ、前節では先行研究の問題点を述べ解決法を提案した。

本節ではそれらを踏まえ、本研究で開発する関節機能に備える具体的な機能についてまとめる。

まず、本研究で開発する関節機構について Table3.1 にまとめた。

本研究で開発する関節機構は、ロボットハンドで多く用いられる関節の関節自由度が 1 自由度であることから 1 自由度とし、可動域は 0～90deg とする。また、サイズや重量はヒトの値のものを使用し、それより小型であることを条件とした。

小型のロボットハンドであることから、常にリジッドな関節ではなく関節機能と破壊防止機能の優先度を負荷に応じて変化させ、過負荷時の脱臼によって保護する機能を備えさせ、リジッドな動作を実現させるための機能を脱臼防止機能、過負荷時に脱臼させる機能をフォースリミッタ機構をとした。フォースリミッタ機能が発動して関節が脱臼した後に関節の機能回復を容易にするための自動回復機能を備えさせる。また、除荷による回復を行うことで過負荷時のみに、脱臼する関節となり、平常時は常にリジッドな動作と耐故障性の両立を実現する関節機構となる。

Table 3.1 開発する関節機構の仕様

項目	内容
サイズ・重量	ヒトの値以下のサイズ、重量
関節の種類・自由度・可動域	すべり関節・1 自由度・0～90[deg]
脱臼防止機能	低負荷時のリジッドな動作を実現
フォースリミッタ機能	過負荷時に関節を脱臼させ、関節の破壊を防止
自動回復機能	脱臼後、除荷による関節機能の回復

3.4 関節の剛性獲得のための靱帯機構

ロボットハンドで多様な物体の把持や操作を実現するために、低負荷時の関節のリジッドな動作が必要である。そこで本研究では Fig.3.2, Fig.3.3 に示す靱帯機構を開発した。Fig.3.2 はその機構の構成を、Fig.3.3 はその機構の動作の様子を示した図である。

この機構は、Fig.3.2 左図のようにリンク 1 と 2 をワイヤで結合したすべり関節であり、ワイヤをきつく締結することで関節に負荷がかかった場合もリジッドな動作を行う関節を実現するものである。

結合ワイヤのルートは図のように、リンク 1 の片側からガイドを通過し、リンク 2 の内部を通過して反対側に出た後、再びガイドを通過した後リンク 1 の反対側で締結される経路になっている。ワイヤを常に関節の回転中心を通過するようにガイドすることによって、Fig.3.2 右図のように関節が回転運動を行った場合でもワイヤが緩むことがないため、関節の回転角度に依らずにリジッドなすべり関節を実現している。

リンク 2 がリンク 1 に嵌合するような摺動面形状にすることで、ねじりや引張方向の負荷においてもリジッドな関節の実現を可能にしている。

リンクの強度においてもワイヤの通過孔の微小な穴を除いて中実であり靱帯機構を構成する部品数も少ないことから、リンクの強度を損なわない機構を実現している。

従って Fig.3.3 のように、靱帯機構は、関節の回転角度や指先にかかる負荷の方向に依らずに常にリジッドな動作を実現する。

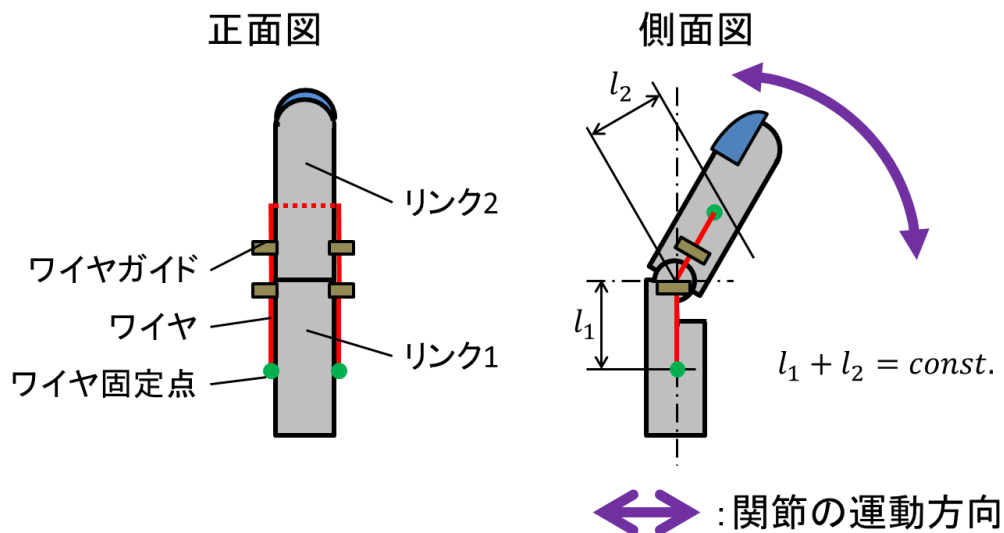


Fig.3.2 関節の剛性獲得のための靱帯機構の構成

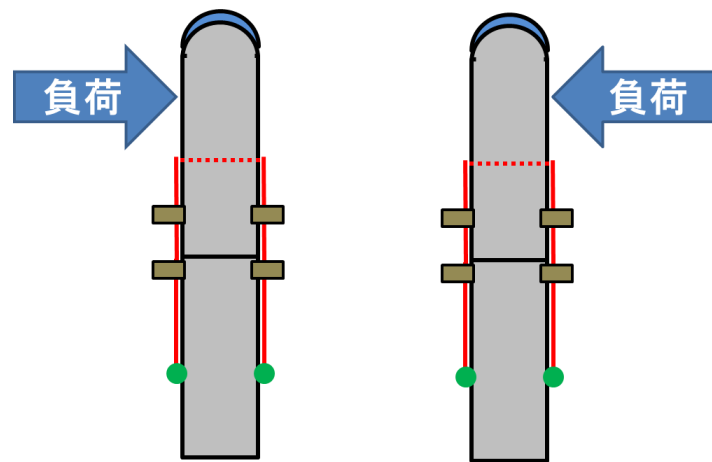


Fig.3.3 負荷の方向に対する靱帯機構の動作

3.5 関節破壊防止のためのフォースリミッタ機構

前節で述べた靱帯機構でリジッドな関節を実現することができたが、靱帯機構のみでは降伏応力を超える過負荷に対して関節が破損してしまうという問題は依然として存在している。

靱帯機構はワイヤの長さが関節角度によって変化しないという条件下で、ワイヤの締結点はリンク1に制限されないため、Fig.3.4のようなフォースリミッタ機構を挿入することが可能である。そこで本研究では3.2節で提案したように、掌内部に内蔵可能な、自動回復機能を有する小型のフォースリミッタ機構を開発した。本節では、そのフォースリミッタ機構について述べる。

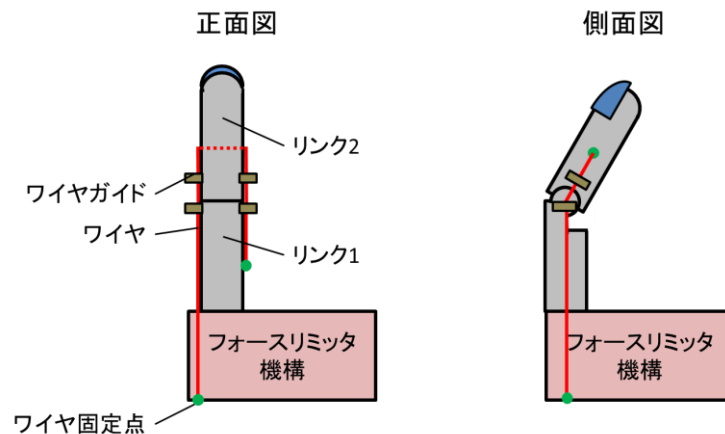


Fig.3.4 靱帯機構とフォースリミッタ機構の位置関係

3.5.1 フォースリミッタ機構に使用する現象の決定

フォースリミッタ機構の機能として備えなければならない機能は、過負荷に応じて適切に縮みすべり関節が脱臼することで、すなわち過負荷時にワイヤの緩みを生じさせることである。また、小型化のために通常時は剛体で過負荷時は脆性破壊に似た挙動を示し、無負荷で無限変異することで関節の脱臼を阻害しないことが好ましい。そこで、それらの条件が適合するようなものをTable3.2にまとめた。

Table 3.2 脆性破壊に似た挙動を示す物質

種類	耐力	回復方法
ワイヤの破断	10～500 N	交換
磁石の磁力	3～10N/mm ²	接触
金属線の座屈	0～200N	交換，形状記憶効果，超弾性効果

もっとも小型で実現できるものが、ワイヤが破断する力をフォースリミットとするものである。この手法は軽量かつ靱帯機構に機構の追加なく行えるが、ワイヤの材料のばらつきによる破断時の力の違い、消耗による耐力の低下など、リミットとして値を決めることが困難である問題がある。加えて回復方法も交換以外になく一度破断してしまうとメンテナンスするまで関節としての

機能を失ってしまうため、適当な手法とは言えない。

次の磁石の磁力で行う手法でも十分な耐力を得ることが可能である。またその耐力も磁石の表面積によって決定されるものであり、任意の値に決定できる。加えて回復方法も表面同士を接触させるだけなので、容易であると言える。しかし、掌内部に強力磁場を発生させるため、使用するセンサに限りが出てしまうことや、磁性を持つ小物体などを手から放せなくなるという問題が生じてしまう。また、磁石が異なる組合せのものとくっつかないようなスライダ等の機構を導入しなければならず、小型化も困難である。従って、多様な物体の把持を行う小型ロボットハンドでの使用には適していない。

3 つ目の金属線の座屈はワイヤの張力によって金属線を圧縮し、座屈させることでワイヤを緩ませる手法である。この方法は、ワイヤの破断に比べて耐力は小さいが、掌内部に組み込むには十分に小型で、磁力の発生などの問題も発生しない。加えて座屈荷重などのモデル化も行えるため、任意の耐力に設定することが可能である。一般の金属では金属が降伏し変形してしまった場合は交換による機能の回復が必要なため、回復が容易とはいえないが、形状記憶合金や超弾性合金などの形状記憶効果を用いることで、加熱や除荷による関節機能の回復が可能となる。従って、小型かつ十分な耐力を持つうえで容易な回復が実現可能である。

以上で述べたことをまとめると、小型かつ容易な回復を行える手法でありフォースリミッタとして適用可能な手法は超弾性合金を用いた金属線の座屈現象であることがわかる。そこで本研究では、超弾性合金の座屈現象を利用したフォースリミッタ機構の開発を行った。

3.5.2 超弾性合金の座屈を利用したフォースリミッタ機構の概要

開発したフォースリミッタ機構の概要を Fig.3.5、動作の様子を Fig.3.6 に示す。

この機構は、リンク 1 の下部に配置されたキャップを 2 つとそのキャップに固定された数本の細い超弾性合金によって構成されている。前節で述べた靱帯機構の片側のワイヤ固定点を変更し、右図の下側のキャップに固定することで、ワイヤの張力によって超弾性合金を圧縮するようにしたものである。

座屈現象は座屈を起こすまではほとんど変形しないため、通常時このフォースリミッタが靱帯機構の機能を阻害することはない。一方で過負荷がかかった場合は Fig.3.6(a)に示すように大きく変形し、関節が脱臼するワイヤの緩みを発生させる。この時の曲げ応力は座屈応力よりもはるかに小さく、過負荷がかかり続ける場合は変形が止まることなく脆性破壊のような挙動を示す。また、靱帯機構が 1 本のワイヤで構成されていることから張力はワイヤ全体に等しく伝わるため、指先にかかる負荷の方向に関係なくフォースリミッタ機構の動作を行うことが可能である。

また、超弾性合金は超弾性効果によって形状回復するため、Fig3.6(b)のように除荷を行うと超弾性合金による復帰力が負荷より大きくなるため、関節の形状回復が行われ関節の機能回復を実現させる。

正面図

側面図

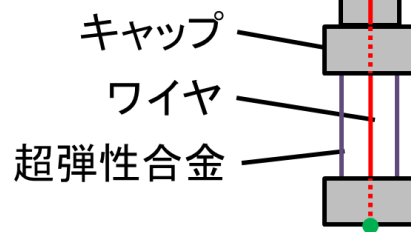
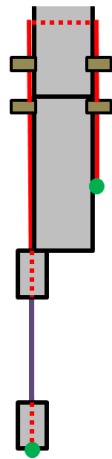
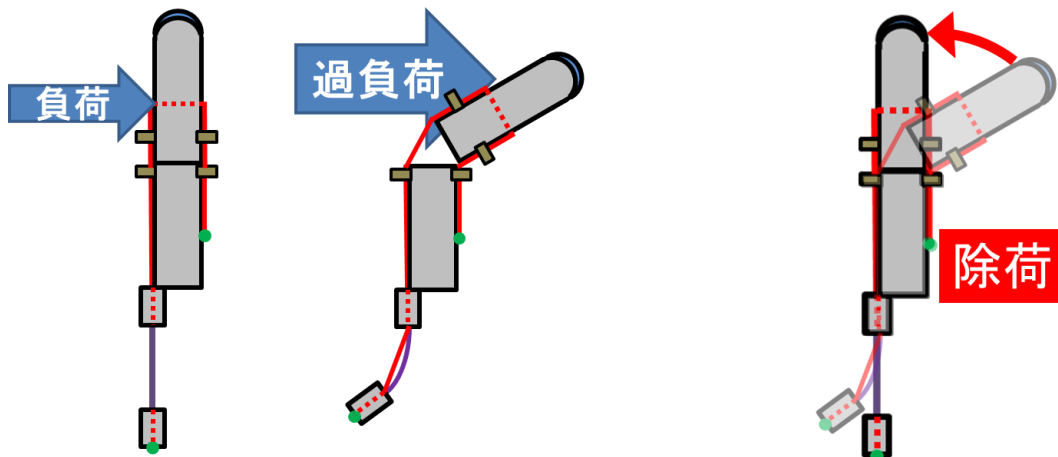


Fig.3.5 超弾性合金の座屈現象を利用したフォースリミッタ機構の概要



(a) 負荷による挙動の違い

(b)脱臼時の関節機能の回復

Fig.3.6 フォースリミッタ機構の動作

3.6 フォースリミッタ機構のモデル化

前節で述べたフォースリミッタ機構を任意の負荷で発動させ、任意の変形量を得るためには、フォースリミッタ機構のモデル化を行う必要がある。

本節では、それぞれの項目についてモデル化を行い、その詳細について説明する。

3.6.1 モデルが求められる項目

モデル化を立てなければならない項目は次の 2 項目が挙げられる。一つ目はフォースリミッタ発動時の負荷を決定する座屈荷重である。これは関節が脱臼するときの負荷を決定するものであり、関節破壊を防止するためのフォースリミット値となる。従って、適切なリミット値を設定するためには、座屈荷重のモデルが必要である。

次にモデル化しなければならないのは、超弾性合金の座屈量、すなわちワイヤの緩み量と最大ひずみ量のモデル化である。これは、超弾性合金の超弾性効果にも限界があり、回復限界以下のひずみ量で脱臼に十分なワイヤの緩みを発生させなければならない。そのため、回復限界以下のひずみ量で機構を制作するためにはワイヤの緩み量とひずみ量の関係式が必要である。

本節では、Table3.3, Fig.3.7 のようにそれぞれのパラメータ部位と記号を定義し、座屈荷重とひずみ量のモデル化を行う。

Table3.3 パラメータの記号とその定義

記号	定義
L_{SEA}	超弾性合金の長さ
D_{SEA}	超弾性合金の直径
P_k	フォースリミッタ機構発動時の座屈荷重およびワイヤの張力
m	フォースリミッタ機構に使用される超弾性合金の本数
n	超弾性合金の端末係数
E	超弾性合金のヤング率
I	超弾性合金線材の断面 2 次モーメント
L_b	超弾性合金が十分に座屈した後のキャップ間距離
A	超弾性合金が十分に座屈した後の金属線材の振幅

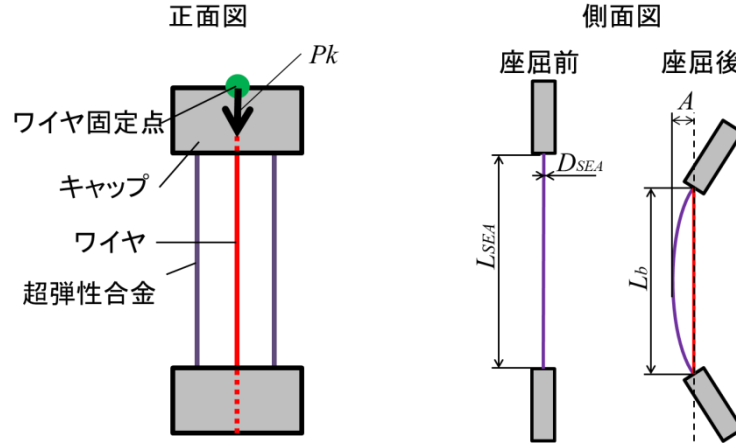


Fig.3.7 パラメータの部位と記号の関係

3.6.2 金属線の座屈荷重のモデル

長柱の座屈荷重 P_k は一般に、次の式 3.1 で求められることが知られている[日本機械学会 2011a].

$$P_k = m \times n \frac{\pi^2 EI}{L_{SEA}^2} \quad (3.1)$$

提案機構で使用されている超弾性合金の両端の条件は回転-回転であることから、両端条件の係数 n は $n=1$ である.

また、中実円筒における断面 2 次モーメント I は次の式であらわされる.

$$I = \frac{\pi D_{SEA}^4}{64} \quad (3.2)$$

よって、式 3.2 を式 3.1 に代入すると、次の式のように表される.

$$P_k = m \times n \frac{\pi^3 E D_{SEA}^4}{64 L_{SEA}^2} \quad (3.3)$$

式 3.3 から、本数の m 、超弾性合金の長さの L_{SEA} 、超弾性合金の直径の D_{SEA} が決定できれば座屈荷重が決定できることがわかる. 一方、座屈荷重の設定において座屈荷重の最大値は関節機構の降伏応力であることから、関節部の材料や大きさ、形状によって決定される. ここで、超弾性合金のパラメータにおいて任意に決定できる値は本数 m 、長さ L_{SEA} 、直径 D_{SEA} の 3 つのパラメータである. また方程式が 1 つ確定しているため、超弾性合金の長さ L_{SEA} と直径 D_{SEA} の 2 つのパラメータにおいて全探索を行うことで適切な値の組み合わせを獲得できる.

3.6.3 金属線の最大ひずみ量のモデル

前項では得られるパラメータの組み合わせでは機構の変形量や超弾性合金の回復限界は考慮されておらず、回復限界を超えない範囲の座屈量で充分に関節が脱臼しなければならない. 本項では、座屈量と最大ひずみのモデル化を行う.

まず、最大曲げひずみを ε_{\max} 、変形後の最小曲率半径を r_{\min} とすると、円管の曲げ最大ひずみ量の値は次のように求められることが一般的に知られている.

$$\varepsilon_{\max} = \frac{D_{\max}}{2} \times \frac{1}{r_{\min}} \quad (3.4)$$

この式から、最大ひずみ量を求めるためには、最小曲率半径が必要であることがわかる。

両端条件 $n=1$ の長柱が座屈した時、座屈後の柱の形状は $\alpha \sin \beta x$ の半周期分の形状に変形する [岩熊 2014]。また曲率が最も小さくなる場所の位置は、 $\beta x = \pi/2$ であることから、最小曲率半径は次の式であらわされる。

$$r_{\min} = \left| \frac{1}{\alpha \beta^2} \right| \quad (3.5)$$

3.6.1 項で示したパラメータを係数 α 、 β に代入すると、次のように表される。

$$\alpha = A \quad (3.6)$$

$$\beta = \frac{\pi}{L_b} \quad (3.7)$$

従って式 3.4 に式 3.5～3.7 を適用すると、次のように最大ひずみ量と超弾性合金のパラメータとの関係を求めることができる。

$$\varepsilon_{\max} = \frac{D_{\max}}{2} \times A \times \left(\frac{\pi}{L_b} \right)^2 \quad (3.8)$$

L_b は超弾性合金が座屈して関節が十分に座屈した後の長さであり、脱臼に必要な座屈量はリンクのサイズや形状によって決定する値である。そのためリンクのパラメータと超弾性合金の長さ L_{SEA} が決定されれば自動的に求まる値である。そこで、式 3.8 を用いて最大ひずみ量を求めるためには、座屈後の超弾性合金のたわみの量である振幅 A を求めなければならない。しかし、座屈量から振幅 A を直接算出することはできない。そこで、超弾性合金の座屈現象を使用していることから、座屈の前後で超弾性合金の長さが変わらないことを利用する。座屈後の超弾性合金が $A \sin(\pi/L_b)x$ の曲線に形状に変形することから、半周期分の曲線の長さを $L(A, L_b)$ として曲線の長さの式に適用すると次の式が得られる。

$$L(A, L_b) = \int_0^{L_b} \sqrt{1 + A^2 \left(\frac{\pi}{L_b} \right)^2 \cos^2 \left(\frac{\pi}{L_b} x \right)} dx \quad (3.9)$$

ここで、変形の前と後で超弾性合金の長さが変わらないことを利用すると式 3.10 が得られる。

$$L_{SEA} = L(A, L_b) \quad (3.10)$$

すなわち

$$L_{SEA} = \int_0^{L_b} \sqrt{1 + A^2 \left(\frac{\pi}{L_b} \right)^2 \cos^2 \left(\frac{\pi}{L_b} x \right)} dx \quad (3.11)$$

となり、式 3.11 で使用されている変数は振幅 A を除いてすべて既知の値であることから、式 3.11 で振幅 A を決定することができる。

しかし、式 3.11 の式を式変形して $A=f(L_{SEA}, L_b)$ のような形にすることはできないため、直接 A の値を求めることはできない。そこで $L(A, L_b)$ が振幅 A において単調増加であることから、本研究では二分法による数値計算を用いて算出することで A の値を求めた。

振幅 A がリンクの形状と超弾性合金の長さによって算出できることから、式 3.8 で求まる最大

ひずみ量は超弾性合金の長さ L_{SEA} と直径 D_{SEA} およびリンク形状によって決まることが分かった。

そこで超弾性合金の長さ L_{SEA} と直径 D_{SEA} において想定される値の範囲で全探索を行うことで、回復限界を超えない範囲で十分な座屈量を得られる長さや直径の組み合わせを得ることができる。

3.6.4 モデル化のまとめ

3.6.2 項で求めた座屈荷重および 3.6.3 項で求めた最大ひずみ量は、リンクの形状などが決定されている条件下では共に超弾性合金の長さ L_{SEA} と直径 D_{SEA} の値での全探索によって使用可能なパラメータの組み合わせを得られることが分かり、任意の関節において使用可能であることを示した。

そこで本研究では、想定される範囲の超弾性合金の長さ L_{SEA} と直径 D_{SEA} において全探索を行い、リンク形状から得られた降伏応力および脱臼に必要な座屈量で絞り込み、排出された使用可能なパラメータ群の中から最も少ない本数で構成可能なものを使用した。

3.7 おわりに

本章では、先行研究の関節機構の問題を解決し、剛性と耐故障性の両立が可能な新規関節機構の提案とモデル化を行った。

3.2 節では、先行研究で開発されたすべり軸受け機構の概要を述べ、リンクの強度が著しく低下することと高い関節の剛性が得られないことを述べた。

3.3 節では、前章までに述べた関節についての要件と先行研究についてまとめ、本研究で開発する関節の使用や関節が有する機能についてまとめた。

3.4 節では、全方向の負荷に対し低負荷時にリジッドな動作を行い、関節の回転角度に依らずに機能を持つことが可能な靱帯機構の概要を述べた。

3.5 節では、フォースリミッタ機構に使用する現象を決定し、超弾性合金線材の座屈現象を利用したフォースリミッタ機構の概要を述べた。

3.6 節では、フォースリミッタ機構で使用する超弾性合金のパラメータを決定するためのモデル化を行い、超弾性合金の長さや直径の全探索によって使用可能なパラメータの組み合わせが得られることを説明した。

第4章 五指ハンドへの応用

4.1 はじめに	34
4.2 関節機構のパラメータ決定	35
4.3 試作機の製作	36
4.3.1 3DCAD による設計	36
4.3.2 試作機の組み立て	36
4.4 試作機による機構の動作	38
4.4.1 低負荷時の関節機構の動作	38
4.4.2 高負荷時の関節機構の動作	38
4.4.3 除荷による関節機構の自動回復の動作	39
4.5 五指型ロボットハンドへの実装	40
4.5.1 関節機構の実装方法	40
4.5.2 3DCAD による設計	40
4.6 五指型ロボットハンドの制作	41
4.6.1 五指型ロボットハンドの制作	41
4.6.2 五指型ロボットハンドの制御方法	42
4.7 おわりに	43

4.1 はじめに

本章では，前章で述べた関節機構を実際に試作し，機能の実現を確認したうえで五指型ロボットハンドへの搭載を行う．

4.2 節では，前章で述べたモデルに従って理論値計算を行い，関節機構のパラメータを決定する．

4.3 節では，関節機構の1指モデルを試作し，要件で述べた項目を満たすかを測定する．

4.4 節では，関節機構の機能が実現しているか，実際に負荷をかけて検証する．

4.5 節では，五指型ロボットハンドに関節機構を実装するための設計を行う．

4.6 節では，設計した五指型ロボットハンドを実際に組み立て，その詳細と制御手法について述べる．

4.2 関節機構のパラメータ決定

本章では、前章で述べた関節機構を制作するためにリンクや超弾性合金のパラメータを決定する。

まず、関節のパラメータを Table4.1 に示す。このパラメータはヒトの手大の関節の為、[河内 2012]から装飾用グローブの厚みを考慮して決定した。また、その時の関節の降伏応力は ABS 樹脂を使用することを想定し、[日本機械学会 2011b]の物性値を用いて計算を行ったうえで安全率を考慮し、 $250\text{N} \cdot \text{mm}$ とした。

そこで本研究では、Table4.2 でまとめた超弾性合金の物性値[古川 1997][三田 2010]を基に理論値計算を行い、Table4.3 のようにパラメータを決定した。

Table 4.1 関節のパラメータ

項目	パラメータ
自由度・可動域[deg]	1 自由度・0~90
縦[mm]×横[mm]	6×8
関節破壊時のねじりモーメント[N・mm]	250

Table4.2 理論値計算に用いた超弾性合金の物性値

項目	用いた値
縦段数係数[GPa]	60
回復限界ひずみ量	4%

Table4.3 超弾性合金線材のパラメータと理論値

項目	パラメータ
超弾性合金の長さ[mm]	38
超弾性合金の直径[mm]	1
本数[本]	2
座屈荷重の理論値[N]	40
超弾性合金座屈時のねじりモーメント[N・mm]	200
最大ひずみ量の理論値	3%

4.3 試作機の製作

前章で述べた関節機構をそれぞれ決定したパラメータを基に設計，試作した．本節ではその詳細について述べる．

4.3.1 3DCAD による設計

関節機構の設計は Solidworks を用いて行った．関節機構の組立図は Fig.4.1 に示す．

関節に負荷がかかるとき，最も負荷が高く破損しやすい場所は指先から最も遠くモーメントアームが最大となる根元の関節である．そこで，本研究では前章までに述べた機構を根元の関節に挿入し，他の関節には一般のロボットハンドで使用されるピン関節を使用した．また本機構はワイヤガイドに高い負荷がかかることが想定される．そこで，ワイヤガイドはリンクの内部に内包できるようにし，ワイヤガイドの破損を防止する．また，関節機構は可能な限り突起を減らし，応力集中の防止を図った．

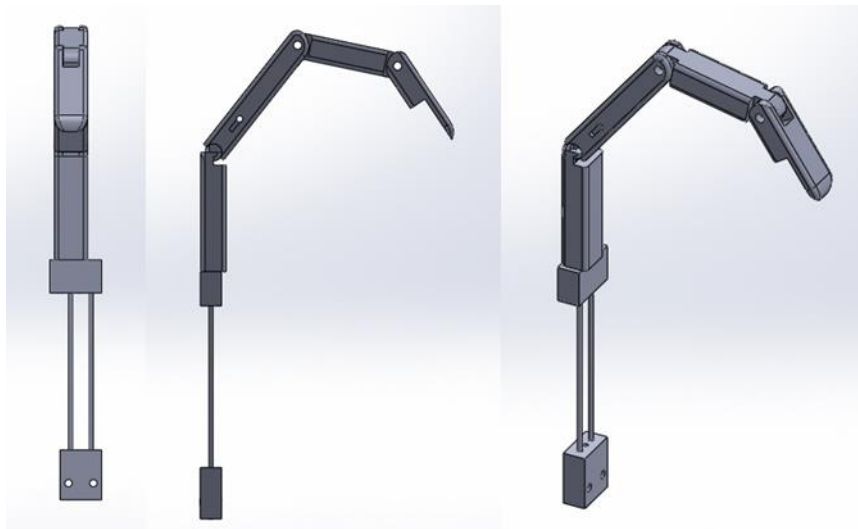


Fig.4.1 3 次元 CAD 上の関節機構の組み立て図

4.3.2 試作機の組み立て

前項の設計を基に制作を行った．実際に組み立てたものを Fig.4.2 に示す．

リンク 1,2 およびキャップは 3 次元造形機 u-Print を用いて作成した．その材料は重量と強度を考慮し，ABS 樹脂を使用した．また，超弾性合金は吉見製作所の超弾性直線記憶線材 $\phi 1$ を使用し，ワイヤは UNITIKA 社製の PE 繊維(耐荷重 56.5kg)を使用した．本試作機では超弾性合金が回復限界を超えてひずまないようにスペーサを挿入した．

試作機の可動域や占める領域などは Table4.4 のようになっており，それぞれの項目において目標値を十分に満たしていることがわかる．また，試作機の指 1 本分が掌内部を占める領域は実際の掌の領域の 5%程度であることがわかり，仮に 5 本の指すべてに装着しても十分な領域が確保できることが分かった．重量の目標値は本研究室で従来使用されていた指 1 本分であり，それに比べて提案機構は十分に軽量であることがわかる．

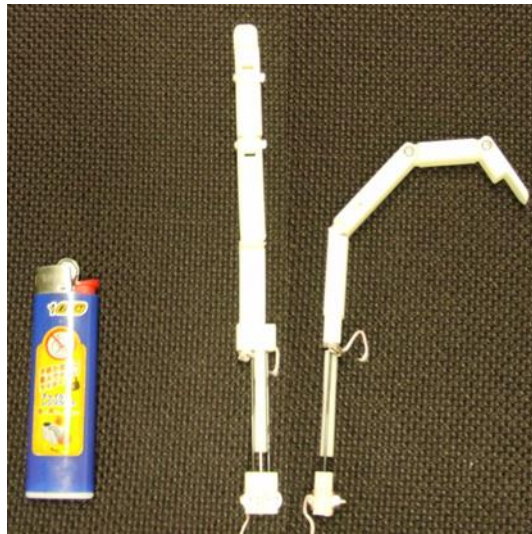


Fig.4.2 制作した試作機

Table 4.4 試作機の目標値と測定値

項目	目標値	測定値
可動域[deg]	0～90	-10～90
掌内部を占める領域(幅×高さ×厚み)[mm]	67×69×19 以下	12.5×59.0×5.0
掌内を占める体積[mm ³]	87000 以下	3688
重量[g]	10	8

4.4 試作機による機構の動作

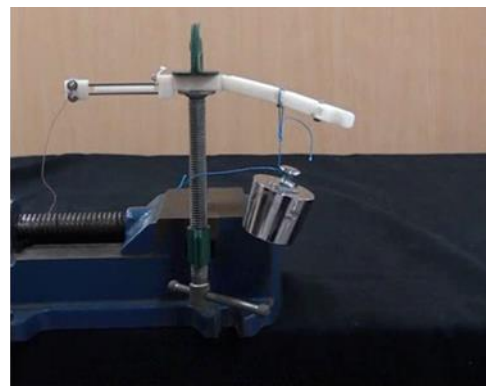
前節では前章までに述べたことを踏まえ関節機構の試作を行った。本節では試作機を用いて、前章で述べた関節機構が負荷に応じて関節の動作が変化し、かつ脱臼後の関節が容易に回復可能であるかを確認した。

4.4.1 低負荷時の関節機構の動作

リンク側面にフォースリミッタ機構が座屈しないような負荷(100g)をかけた時の関節の様子を Fig.4.3 に示す。この時関節にかかったねじりモーメントは約 $26\text{N}\cdot\text{mm}$ である。図からわかるように関節はほとんど変形せず、低負荷時にリジッドな動作を行っていることが確認できる。



(a)負荷をかける前



(b)負荷をかけた後

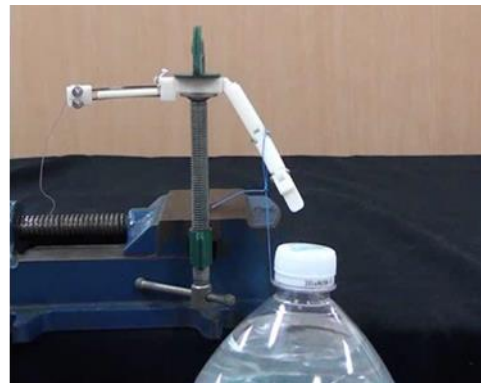
Fig.4.3 低負荷時の関節の動作

4.4.2 高負荷時の関節機構の動作

リンク側面に摺動面の降伏応力を大きく超えるような過負荷(2000g)を掛けた時の関節の動作を Fig.4.4 に示す。この時関節にかかったねじりモーメントは約 $520\text{N}\cdot\text{mm}$ であり、図のように試作機が脱臼して大きく変形していることがわかる。したがって、過負荷が関節にかかった時は関節が脱臼し、脱臼によって負荷の分散が行われて関節の破壊防止を実現していることがわかる。



(a)過負荷をかける前

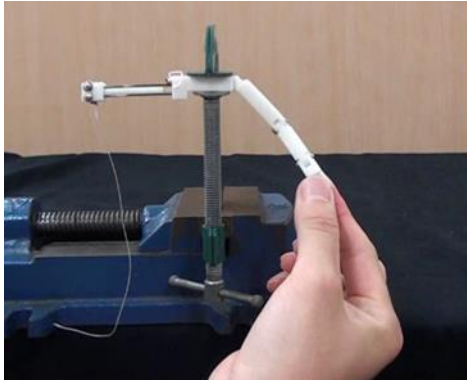


(b)過負荷をかけた後

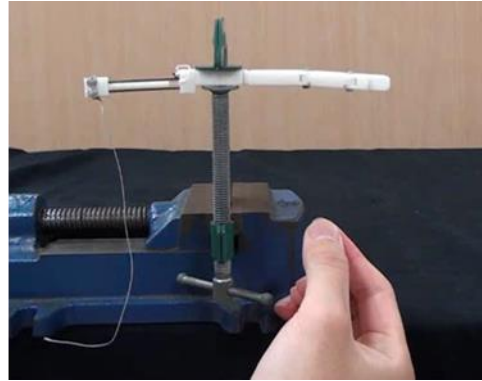
Fig.4.4 過負荷時の関節の動作

4.4.3 除荷による関節機構の自動回復の動作

リンクに過負荷を掛けた後、除荷した時の関節の様子を Fig.4.5 に示す. 図からわかるように、除荷のみで関節が元の形状に戻り、関節の機能を回復していることがわかる. このことからこの関節の脱臼が超弾性合金の回復限界を超えた変形を起こしていないことがわかり、フォースリミッタ機構が複数回に及ぶ使用が可能であることを確認した.



(a)除荷の前



(b)除荷の後

Fig.4.5 除荷による関節の回復

4.5 五指型ロボットハンドへの実装

4.3 節で試作した靱帯機構とフォースリミッタ機構を五指型ロボットハンドに実装するためには，提案機構を適用する関節位置の決定やフォースリミッタ機構の格納位置を決定しなければならない。

本節では提案機構を実装するための具体的な手法について説明する。

4.5.1 関節機構の実装方法

提案機構を適用する関節は，ヒトの手で言う示指と中指の根元にあたる部位とした．これは示指と中指がヒトの手に置いて特に使用頻度の高い重要な指であり，その根元の関節には高負荷がかかるからである[長尾 1971]．

実際に提案機構をロボットハンドに実装する時，Fig.4.2 のようにリンクの下部に直接キャップが接続されている場合，リンクとフォースリミッタ機構の長さの和が大きくなるため，キャップの配置が適切な位置ではないことが言える．一方でフォースリミッタ機構は靱帯機構と 1 本のワイヤでつながれていることから，リンクとキャップの相対位置が常に不変であればキャップの取り付け位置に影響がない．したがって，リンク背面からワイヤを取り出して関節の回転中心付近にキャップを取り付けることで，全体を小型化する手法を用いた．加えて，キャップの材質も ABS 樹脂から金属に変更することで小型化を行い，内部への組み込みを行った．

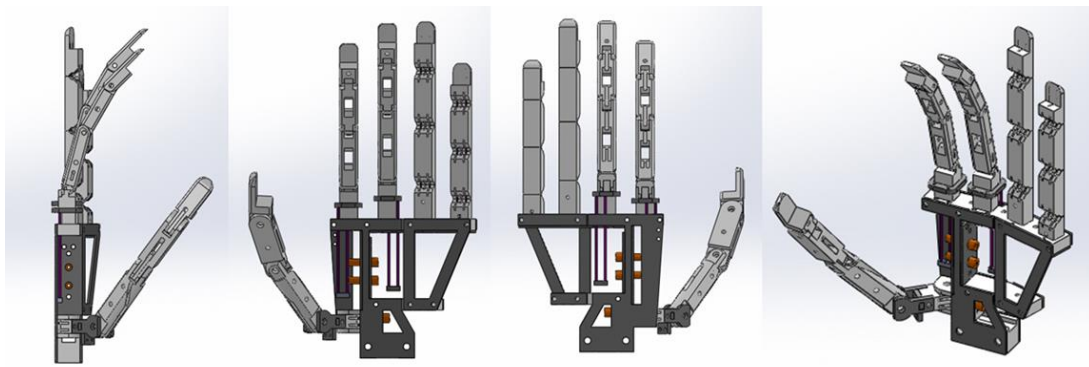
4.5.2 3DCAD による設計

前項で述べたことを踏まえて実際に設計を行ったものを Fig4.6 に示す．

ロボットハンドのサイズのパラメータは[河内 2012]を参考にして成人女性の手のサイズで作成した．

母指機構には[高澤 2013]を使用した．この母指機構は手首と 4 指の固定点までの間を細い 1 本の柱でつないでおり，掌の強度が低くなる．そこで本研究では金属製のフレームを作り，フレームで覆うことによって強度を向上した．

また環指，小指は剛性を必要とするような把持においては使用頻度が低いため，2.4.3 項で説明した弾性体で接続した関節を使用し，握りにおける親和性の向上と耐衝撃性の獲得を行った．



白:ABS樹脂, 灰:ジュラルミン, 紫:超弾性合金, 橙:真鍮

Fig.4.6 3次元 CAD 上の五指型ロボットハンド

4.6 五指型ロボットハンドの制作

本節では、前節で説明したロボットハンドの制作について述べる。

4.6.1 項ではロボットハンドの制作及び組み立てについて、4.6.2 項ではハンドを動作させるための制御手法について述べる。

4.6.1 五指型ロボットハンドの制作

前節で設計したものを基に組み立てたものを Fig.4.7, Fig.4.8 に示す。Fig.4.8 は Fig.4.7 のロボットハンドにウレタンとエラストマー樹脂製装飾用グローブ(61g)を装着し、ロボットハンド表面に柔軟性を持たせたものである。

ロボットハンドの掌や指は重量とラピッドプロトタイピングを考慮して ABS 樹脂を 3 次元造形機 u-print を使用して造形し、フレーム部は強度と重量、浸食性を考慮してジュラルミン A2017 を使用した。牽引ワイヤには UNITIKA 社製の PE 繊維(耐荷重 56.5kg)を使用し、超弾性合金は吉見製作所のものを使用した。

使用したモータは 1 個当たりの重量が 28g で牽引トルクが $529\text{N} \cdot \text{mm}$ である GWS 社の MICRO2BBMG をロボットハンド全体で 8 個使用し、母指に 3 個、示指と中指には 2 個ずつ、環指と小指は 2 本の指に対して 1 個使用した。

このロボットハンドのハンド部の重量と全体の重量の目標値と実測値を Table4.5 にまとめた。この表で用いた目標値はハンドの重量はヒトの手とし、全体の目標重量はヒトの前腕の重量とした[R.F.Chandler 1975]。Table4.5 からわかるように、ヒトの手よりも軽量であることから十分に小型で軽量の五指型ロボットハンドが実現できていることが確認できる。

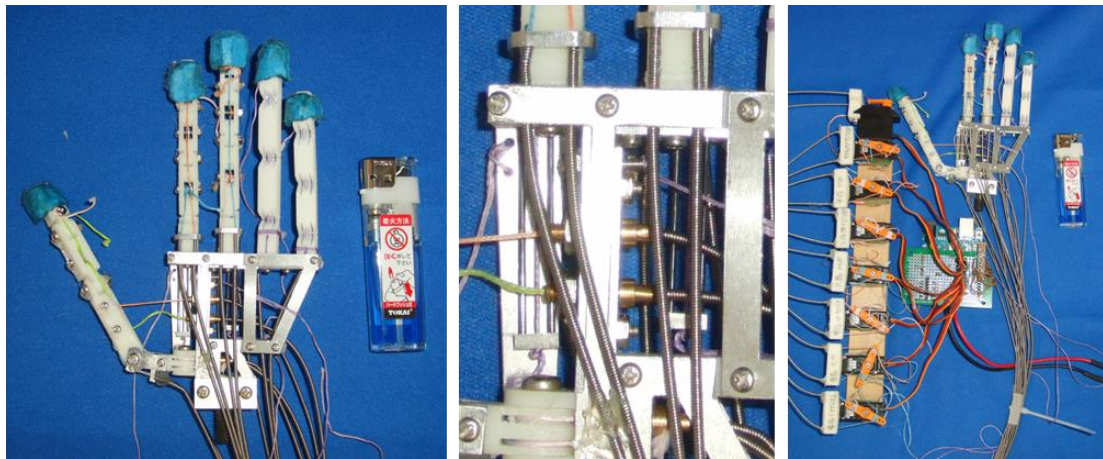


Fig.4.7 五指型ロボットハンドの外観



Fig.4.8 装飾用グローブ装着後のロボットハンドの外観

Table4.5 重量の目標値と実測値

項目	目標値	実測値
ハンド部[g]	400 以下	173(グローブ含む)
全体重量[g]	1113 以下	656

4.6.2 五指型ロボットハンドの制御方法

開発したロボットハンドはヒトの手形のロボットハンドであることから、曲げセンサによるマスタースレーブ方式を用いることが、直感的に操作しやすい制御方式であると考えた。

そこで本研究では、マスタースレーブ方式を採用し、各指の関節角度を計測可能なデータグローブの製作を行った。制作したデータグローブを Fig.4.9 に示す。このデータグローブは、母指の運動に 3 本、示指、中指、環指の運動に各 1 本の計 6 本の曲げセンサ(SWITCH SCIENCE 社製)が装着されている。

また、モータの制御マイコンにはラピッドプロトタイピングを優先し、Arduino UNO を使用した。



Fig.4.9 データグローブ

4.7 おわりに

本章では，試作機を基に機能の検証を行い，五指型ロボットハンドに関節機構を実装した．

4.2 節では，理論値に基づいた関節機構のパラメータ決定を行った．

4.3 節では，決定したパラメータを使用して制作した試作機について説明し，関節機構が要件を満たすサイズで実現できたことを示した．

4.4 節では，試作機を用いて靱帯機構，フォースリミッタ機構およびその自動回復機能が実現されているかを検証し，実際に動作していることを確認した．

4.5 節では，開発した関節機構を五指型ロボットハンドに実装するために考慮すべき点をまとめ，具体的な設計を行った．

4.6 節では，設計に基づいて制作された五指型ロボットハンドの組み立てに対する詳細と，その制御手法の決定を行った．

第5章 関節機構の性能評価

5.1 はじめに	46
5.2 フォースリミッタ機構が発動する時の荷重の測定	47
5.2.1 実験内容	47
5.2.2 実験結果	47
5.2.3 考察	48
5.3 多様な物体における把持能力試験	49
5.3.1 実験内容	49
5.3.2 実験結果	50
5.3.3 考察	54
5.4 ピック&プレイス実験	55
5.4.1 実験内容	55
5.4.2 実験結果	56
5.4.3 考察	57
5.5 タスク実行実験	59
5.5.1 実験内容	59
5.5.2 実験結果	59
5.5.3 考察	62
5.6 関節機構性能評価のまとめと考察	63
5.7 おわりに	64

5.1 はじめに

本章では開発したフォースリミッタ機構の座屈荷重や実装した五指型ロボットハンドの機能について計測し，その評価を行う．

5.2 節では，フォースリミッタ機構が適切な座屈荷重に設定できているか，繰り返し使用が可能かを検証し，評価する．

5.3 節では，関節機構を実装した五指型ロボットハンドが多様な物体に対応した把持が可能であるかを検証し，評価する．

5.4 節では，関節機構を実装した五指型ロボットハンドが多様な物体に対してアプローチ可能か，安定した関節の駆動が行われているかを検証し，評価する．

5.5 節では，関節機構を実装した五指型ロボットハンドが日常で行うタスクの中で，各把持形態の中でも関節に負荷のかかりやすい代表的なタスクを行い，タスクの実現が可能であるかを検証し，評価する．

5.6 節では，本章で行った評価実験についてまとめ，関節機構と機構が搭載された五指型ロボットハンドの性能評価を行う．

5.2 フォースリミッタ機構が発動する時の荷重の測定

開発したフォースリミッタ機構の座屈荷重が適切に設定されていることや座屈後に超弾性合金が形状を復帰して多数回に及ぶ使用に耐えうるかを検証した。本節では、その実験内容と結果について説明し、結果を考察する。

5.2.1 実験内容

座屈荷重の測定に使用した実験の模式図を Fig5.1 に示す。この実験は図の右側のキャップを固定した状態でワイヤに直接接続されたフォースゲージに少しずつ荷重を増やしながら牽引し、ワイヤが座屈した時点の座屈荷重をフォースゲージのピークとして記録した。

フォースリミッタ機構を 5 つ使用してこれを各 100 試行ずつ行い、座屈荷重の平均と分散、座屈荷重の推移を獲得し、関節のサイズを用いて脱臼時のねじりモーメントを算出した。

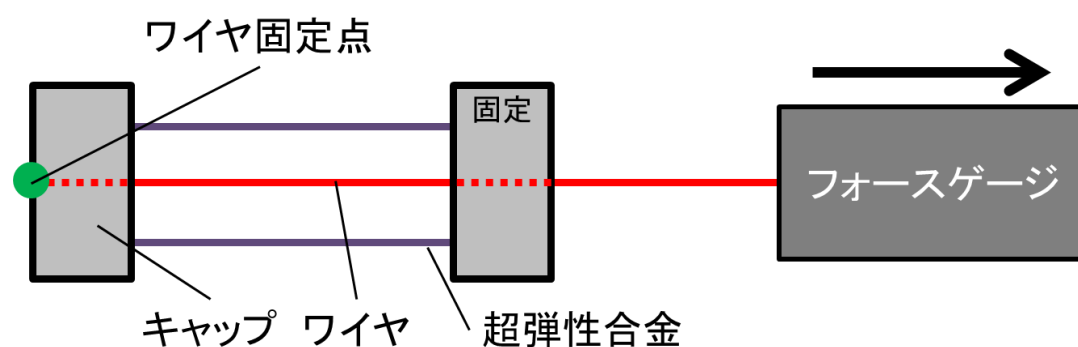


Fig.5.1 座屈荷重計測実験の概要

5.2.2 実験結果

計測結果から得られた座屈荷重の平均値と標準偏差、関節脱臼時のねじりモーメントを Table5.1 に、得られた座屈荷重の変化の推移を Fig5.2 に示す。

Table5.1 得られた座屈荷重とねじりモーメント

試験片	a	b	c	d	e	全試験片 平均
試験片長さ[mm]	38.0	37.8	38.0	37.9	38.0	37.9
座屈荷重[N]	40.4	41.8	41.5	42.0	41.4	41.4
標準偏差[N]	0.53	0.17	0.24	0.36	0.26	0.67
座屈時のねじりモーメント[N・mm]	202	209	207	210	207	207

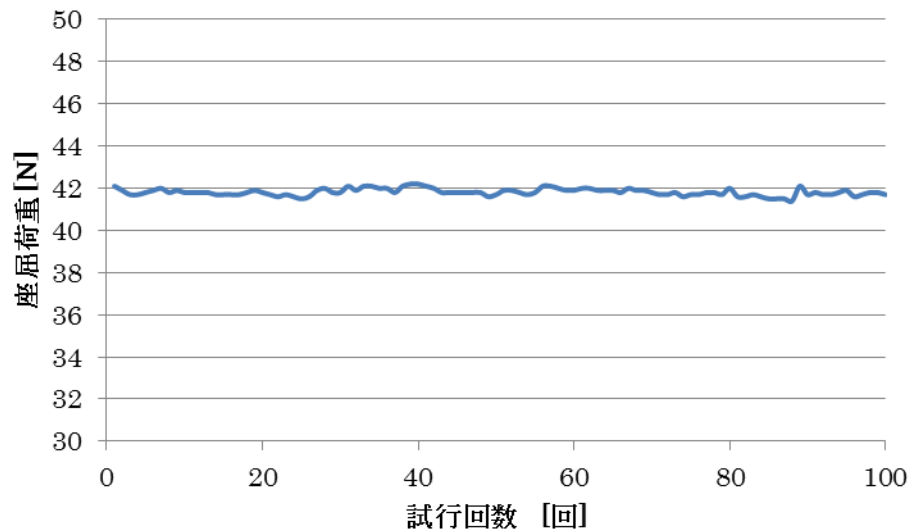


Fig.5.2 座屈荷重の推移(試験片 b)

5.2.3 考察

Table5.1 から、同じパラメータで作られたフォースリミッタ機構の座屈荷重が同じ値を示していることから、モデルで使用したパラメータが適切であることが示唆されている。また、座屈時のねじりモーメントに変換した値は要件で述べた関節の剛性($160\text{N} \cdot \text{mm}$)よりも大きく、かつ関節が破壊するときのねじりモーメント($250\text{N} \cdot \text{mm}$)よりも小さいことから、日常で使用するタスクの実現と関節の破壊防止両方の実現が行われていることがわかる。

Fig.5.2 から、回数に対して座屈荷重の値が大きく低下していないことが確認できる。座屈後の超弾性合金が除荷後に変形が残っている場合、座屈荷重は回数を応じて下がるのに対し、座屈荷重が低下しないということは超弾性合金に変形が残っておらず変形前の直線形状まで回復していることが言える。そのため、超弾性合金の座屈変形が回復限界を越えずに行われていることが言え、適切な変形量を指定できていることがわかる。このことから、フォースリミッタ機構が多数回に及ぶ使用に耐えられることが考えられ、超弾性合金による関節機能の自動回復が実現できていることがわかる。

以上の事から、3 章で説明したモデルで得た座屈荷重と最大ひずみ量が、実際の超弾性合金を用いた機構において適切な値を取ることができ、日常生活のタスク実現と関節破壊の防止、多数回における自動回復機構の耐用性が実現できたことがわかる。

5.3 多様な物体における把持能力試験

関節機構がロボットハンドに与える影響を調べるために、日常で使用するような多様な物品に対して把持能力試験を行った。本節では実験内容や結果について説明し、結果を考察する。

5.3.1 実験内容

日常生活でされる物体を、形状の重複がないように Fig.5.3 に示す物体を集め、ヒトが把持する時と同様の把持形態で把持して把持が可能かを確認した。Table5.2 にそれぞれの把持物体の把持部形状、重量、把持部の断面の寸法まとめた。

実験で行った把持形態は、次の4通りである。

- 握力把握 : 球や筒などを5指で包み込むように握る動作
- 握力把握・伸展型 : 皿などを持つときの、4指が伸展し母指で握る動作
- 精密把握 : 母指と示指の2指、もしくは中指を含めた3指による握り
- 側面把握 : 母指を4指に並立させ、母指と示指の間に挟む握り

把持能力試験では、把持物体は手渡しで渡した後ロボットハンドが把持形態を保持した状態で5秒以上物体を落とさなかった場合を把持成功として記録した。また、複数の把持形態が考えられる物体においてはそれぞれ別に把持させて記録した。



Fig.5.3 使用した把持物体の外観

Table5.2 使用した把持物体の重量・寸法

番号	品名(把持方法)	重量 [g]	把持部 形状	寸法[mm]
1	ビー玉	6	球	直径 16.9
2	積み木玉	24	球	直径 40.7
3	スポンジボール	33	球	直径 70
4	ペットボトルキャップ	2	円柱	直径 30 高さ 14
5	単 4 電池	11	円柱	直径 10.2 高さ 44.4
6	単 3 電池	23	円柱	直径 13.9 高さ 50.2
7	単 1 電池	103	円柱	直径 32.8 高さ 61.1
8	コイン	5	円盤	直径 25 厚さ 1.6
9	鍵	10	薄板	縦 13.9 横 25.8 厚さ 2.3
10	カード	4	薄板	縦 54 横 85.7 厚さ 0.6
11	大学ノート	138	薄板	縦 258 横 182 厚さ 3.8
12	歯ブラシ	13	直方体	縦 7.1 横 12.8
13	果物ナイフ	50	直方体	縦 18.5 横 10.5
14	消しゴム	18	直方体	縦 7.1 横 24.4 厚さ 10.7
15	デジタルカメラ	113	直方体	縦 55.2 横 93.6 厚さ 19
16	ボールペン	13	円柱	直径 12.6
17	太マジックペン	24	円柱	直径 17.6
18-a	茶碗(縁摘み)	132	薄板	厚さ 4
18-b	茶碗(使用前提)	132	ドーム	直径(上)120 直径(下)45 高さ 54
19-a	皿(上向き)	263	円盤	直径 180 厚さ 18
19-b	皿(下向き)	263	円盤	直径 180 厚さ 18
20-a	プラコップ(縁)	49	薄板	厚さ 2.4
20-b	プラコップ(側面)	49	円柱	直径 71.5
21-a	湯呑(縁)	173	薄板	厚さ 4.4
21-b	湯呑(側面)	173	円柱	直径 69.5 高さ 92.4
22-a	500ml ペットボトル(引掛け)	534	円柱	直径 33
22-b	500ml ペットボトル(側面)	534	円柱	直径 60.2
23-a	500ml 紙パック(引掛け)	537	直方体	縦 73 横 73
23-b	500ml 紙パック(側面)	537	直方体	縦 73 横 73

5.3.2 実験結果

把持させた物品の一覧と成否は Table5.3～Table5.6 に、把持時の手指姿勢を Fig.5.4～Fig.5.7 に示す。

Table 5.3 握力把握の成否

番号	品名	成否
2	積み木玉	成功
3	スポンジボール	成功
12	歯ブラシ	成功
13	果物ナイフ	成功
15	デジタルカメラ	成功
20-b	プラコップ(側面)	成功
21-b	湯呑(側面)	成功
22-b	500ml ペットボトル(側面)	成功
23-b	500ml 紙パック(側面)	成功



Fig.5.4 握力把握の様子

Table 5.4 握力把握-伸展型の成否

番号	品名	成否
11	大学ノート	成功
18-a	茶碗(縁摘み)	成功
18-b	茶碗(使用前提)	成功
19-a	皿(上向き)	成功
19-b	皿(下向き)	成功



Fig.5.5 握力把握-伸展型の様子

Table 5.5 精密把握の成否

番号	品名	成否
1	ビー玉	成功
2	積み木玉	成功
3	スポンジボール	成功
4	ペットボトルキャップ	成功
5	単 4 電池	成功
6	単 3 電池	成功
7	単 1 電池	成功
8	コイン	成功
10	カード	成功
11	大学ノート	成功
12	歯ブラシ	成功
13	果物ナイフ	成功
14	消しゴム	成功
15	デジタルカメラ	成功
16	ボールペン	成功
17	太マジックペン	成功
20-a	プラコップ(縁)	成功
21-a	湯呑(縁)	成功
22-a	500ml ペットボトル(引掛け)	成功
23-a	500ml 紙パック(引掛け)	成功

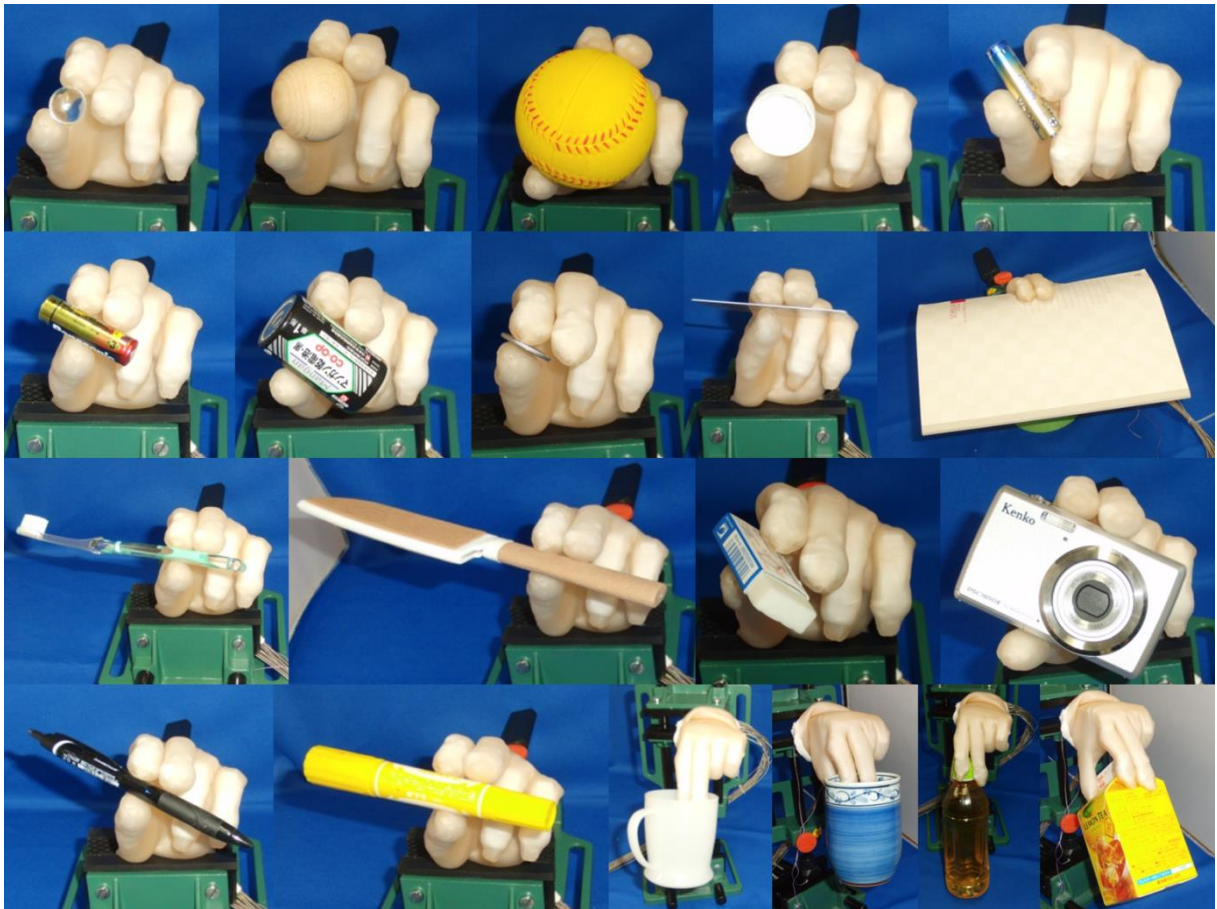


Fig.5.6 精密把握の様子

Table 5.6 側面把握の成否

番号	品名	成否
8	コイン	成功
9	鍵	成功
10	カード	成功
11	大学ノート	成功

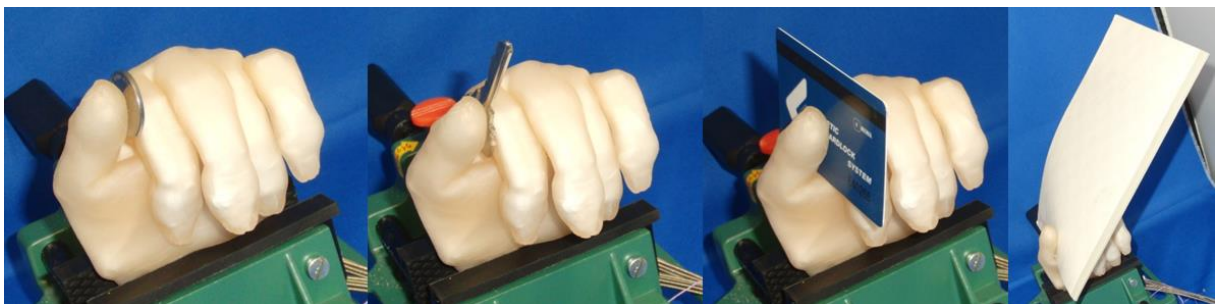


Fig.5.7 側面把握の様子

5.3.3 考察

実験の結果本実験で用いた把持物体、把持姿勢において、全ての項目において物体の把持が成功した。これは、五指型ロボットハンドが多様な物体において把持が可能であり、過負荷時に脱臼する関節機構が物体把持を阻害せず、物体把持において十分な剛性を備えていることが確認でき、すべり関節における多様な物体把持に貢献していることがわかる。

握力把握では、細長いものから円柱形の物、球形、直方体のものなど様々な形状、重量の物体に対して対応して握力把握を行うことが実現できていることがわかる。500ml ペットボトルや500ml 紙パックは手に対して大型であるため、指先に力を込めて把持しなければならないのに対し、開発した五指型ロボットハンドで把握できている。このことから本研究で開発したすべり関節の摺動抵抗が小さく、指や指先に十分な回転トルクを伝達させることができていることが確認できる。また、指先にねじりモーメントがかかっているにも関わらず関節の形状を維持していることから、握力把握で使用する場面においてリジッドな動作が可能であることがわかる。

握力把握・伸展型では、薄板、円盤、ドーム型全てにおいて物体になじんだ手の形状をしていることが確認できる。また、握りこむ形状になっていることから、ねじり方向に対して安定した把持が実現できていることがわかる。

精密把握では、薄板から厚さの大きいもの、小型軽量のものから大型で重量のあるものなど、多様な物体において把持が実現できることが確認できた。特に 500ml ペットボトルや 500ml 紙パックでは握力把握以上に指先に力が必要であり、十分なトルクの伝達が行われていることがわかる。また、この時に関節にかかるねじりモーメントも大きいのに対しリジッドな状態を保ち続けていることから、物体把持に必要な剛性を備えていることが言える。

側面把握では、薄板に対して安定した把持を行うことができていることがわかる。側面把握では母指機構の指先力が直に示指 MP 関節のねじりモーメントになるため、示指の靱帯機構における関節の剛性が十分に備わっていなければならない。実験では示指が脱臼することではなく、把持形態も安定していたことから十分な関節剛性を備えており、側面把握におけるタスクの実現が可能であることを示唆した。先行研究のすべり軸受け機構では脱臼してしまい実現できない把持形態であったことから、開発した関節機構がロボットハンドの把持機能向上に貢献したことが言える。

5.4 ピック&プレイス実験

関節機構が物体へのアプローチの際にどのような影響を与えるのかを調べるために、物体へのアプローチおよび摘み動作によるタスクの代表としてピック&プレイス実験を行った。本節では、その実験内容と結果について説明し、結果を考察する。

5.4.1 実験内容

実験環境は Fig5.8 とし、把持物体は前節の Fig5.3, Table5.2 と同じものを使用した。1 試行を次の(1)から(3)として、(3)まで到達できた試行を成功として記録した。

- (1) 指の屈曲によって指定の場所に指定の姿勢で設置された物体の把持を行い、持ち上げる。
- (2) 物体を把持し、指定の移動先へロボットハンドを移動する。
- (3) 指の進展により、指定の場所に物体を初期姿勢と同様の姿勢で置く。

ロボットハンドの把持形態は物体へのアプローチを行う姿勢として握力把握、握力把握・伸展型、精密把握の 3 動作で行い、それぞれの物体、姿勢において 10 試行ずつピック&プレイスを行って成功の回数を数えた。また、失敗した場合は上記のどのフェーズで失敗したかを記録した。

ロボットハンドには、ヒトに装着して操作できるように、Fig5.9 に示すロボットハンド装着用ソケットを装着して実験を行った。

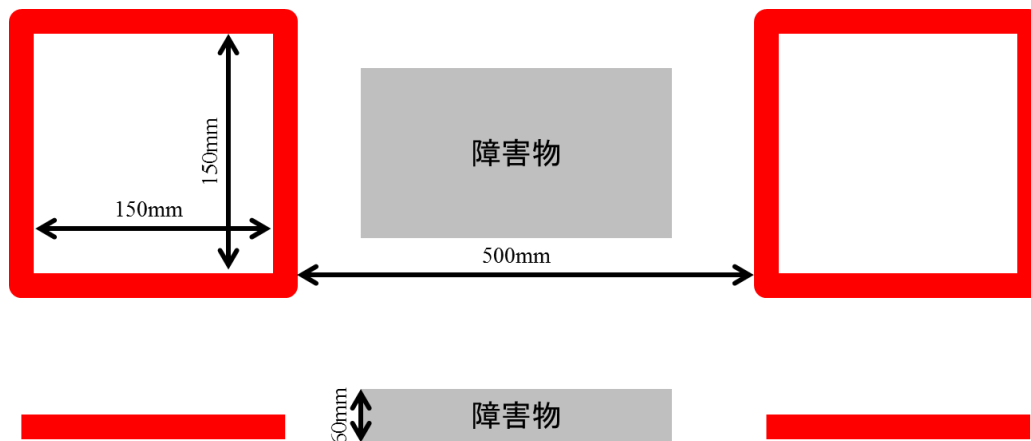


Fig.5.8 ピック & プレイス実験のフィールド



Fig.5.9 ロボットハンド装着用ソケット

5.4.2 実験結果

ピック&プレイス実験の結果を Table5.7 から Table5.9 に示す.

Table 5.7 握力把握におけるピック&プレイス実験の結果

番号	品名	失敗率[%]			成功率 [%]
		フェーズ 1	フェーズ 2	フェーズ 3	
2	積み木玉	10	10	0	80
3	スポンジボール	0	0	0	100
15	デジタルカメラ	0	0	0	100
20-b	プラコップ(側面)	0	0	0	100
20-b	湯呑(側面)	0	0	0	100
22-b	500ml ペットボトル(側面)	20	20	0	60
23-b	500ml 紙パック(側面)	10	0	0	90

Table5.8 握力把握-伸展型におけるピック&プレイス実験の結果

番号	品名	失敗率[%]			成功率 [%]
		フェーズ 1	フェーズ 2	フェーズ 3	
18-a	茶碗(縁摘み)	10	0	0	90
18-b	茶碗(使用前提)	10	20	0	70
19-a	皿(上向き)	0	0	0	100
19-b	皿(下向き)	100	0	0	0

Table5.9 精密把握におけるピック&プレイス実験の結果

番号	品名	失敗率[%]			成功率 [%]
		フェーズ 1	フェーズ 2	フェーズ 3	
1	ビー玉	40	10	0	50
2	積み木玉	0	0	0	100
3	スポンジボール	0	0	0	100
4	ペットボトルキャップ	10	0	10	80
5	単 4 電池	10	0	0	90
6	単 3 電池	10	0	0	90
7	単 1 電池	0	0	0	100
8	コイン	90	0	0	10
9	鍵	100	0	0	0
10	カード	100	0	0	0
11	大学ノート	100	0	0	0
12	歯ブラシ	20	0	0	80
13	果物ナイフ	10	20	10	60
14	消しゴム	30	30	0	40
15	デジタルカメラ	20	0	0	80
16	ボールペン	0	0	0	100
17	太マジックペン	0	0	10	90
20-a	プラコップ(縁)	0	0	0	100
21-a	湯呑(縁)	0	0	0	100
22-a	500ml ペットボトル(引掛け)	0	0	0	100
23-a	500ml 紙パック(引掛け)	10	0	0	90

5.4.3 考察

実験の結果から、握力把握、握力把握-伸展型、精密把握において、多くの物体形状に応じてピッキングが可能であることがわかる。

一方で対応できない形状として全ての把持形態において薄板が挙げられ、ピッキングの安定性が低く、ピッキングが行えない物体があることがわかる。これは、本研究で開発したロボットハンドの指先における軌道計算が十分ではないことや作成したデータグローブも示指、中指に 1 本ずつであることから指姿勢の制御が十分でないこと、爪のような、指先に薄板を引掛けるような機構が入っていないことなどが要因であると考えられるが、関節の脱臼などは発生しておらず開発した関節機構の剛性によるものではないことが考えられる。

把持の安定性においては小さな物体や重量が大きい物体で安定性の低いものがあり、小さな物体ではビー玉や消しゴムや果物ナイフが、重量物体では 500ml ペットボトルが挙げられる。

小さな物体の把持が安定しないことは、薄板と同様に適切な指先の軌道計算が行われていない

ことなどが原因として挙げられる．一方で重量物体の把持が安定しない原因は，指先や関節部の出力不足やピッキング時にかかる関節への大きなねじりモーメントであると考えられる．把持時の大きなねじりモーメントによって環指や小指がねじれてしまい，環指や小指の指先力によってさらにねじれが発生し，示指と中指の把持力が不足したことが物体移動中に物体を落とすことの原因であることが考えられる．

これを防止するためには，環指と小指の機構を変え，より物体を包み込むように変更することや，示指や中指の動力伝達を見直し，より大きな駆動トルクを伝達させることが考えられる．

また，関節の剛性においては，全ての物体のアプローチに対して脱臼は発生しておらず，日常生活におけるピック&プレイスにおいて十分な剛性を備えていることが分かった．

以上の事から，多様な把持を行うためには指先の軌道計算や指先形状の変更など解決しなければならない課題はあるものの，開発した関節機構がピック&プレイスにおいて必要な剛性を十分に備えていることが確認できた．

5.5 タスク実行実験

関節機構が五指型ロボットハンドで行うタスクについてどのような影響を与えるか調べるために、特に関節に負荷のかかるタスクを選定したタスク実行試験を行った。本節では、その実験内容と結果について説明し、結果を考察する。

5.5.1 実験内容

実験で行ったタスクは下記(a)から(h)までの 8 つである。最後まで実行できたタスクを成功とし、記録した。

(a)ドアを開く動作(押してあける)

タスク内容：ドアノブを握力把握で掴んでひねり、ドアを押してあける。

(b)ドアを開く動作(引いてあける)

タスク内容：ドアノブを握力把握で掴んでひねり、ドアを引いてあける。

(c)お盆の操作

タスク内容：お盆を握力把握-伸展型で片手で把持した後、約 1kg の重量物を載せる。

(d)重量物の持ち上げ

タスク内容：床においてある約 2kg のカバンを鉤握りで持ち上げる。

(e)スライド&ピック

タスク内容：机の上に置いたカードを指先の力で机の端まで引き寄せた後、精密把握で摘み上げる。

(f)平皿の把持及び配置

タスク内容：平皿を側面把握で把持した後、約 500g の物体を皿の上に載せ、物体を落とさずに片手で平皿を机の上に配置する。

(g)鍵の開閉動作

タスク内容：鍵を側面把握で握った後、鍵穴に差し込みてひねり、鍵の開閉を行う。

(h)文字書き動作

タスク内容：マジックペンを三面把握で把握した後、ホワイトボード上に文字を書く。

5.5.2 実験結果

タスクの成否を Table5.10 に、タスク実行時の様子を Fig.5.10 から Fig.5.17 に示す。

Table 5.10 タスク実行実験の実験結果

記号	実行タスク	成否
(a)	ドアを開く動作(押して開ける)	成功
(b)	ドアを開く動作(引いて開ける)	成功
(c)	お盆の操作	成功
(d)	重量物の持ち上げ	成功
(e)	スライド&ピック	成功
(f)	平皿の把持及び配置	成功
(g)	鍵の開閉動作	成功
(h)	文字書き動作	成功

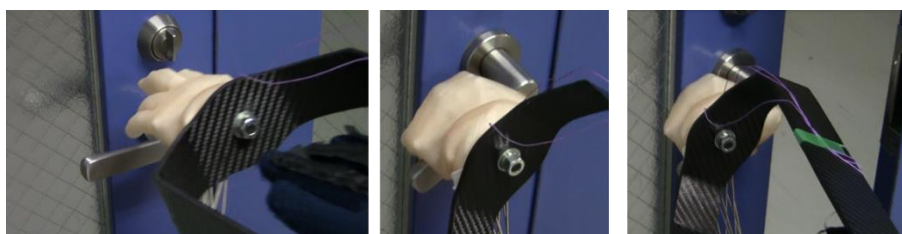


Fig.5.10 ドアを開く動作(押して開ける)の様子

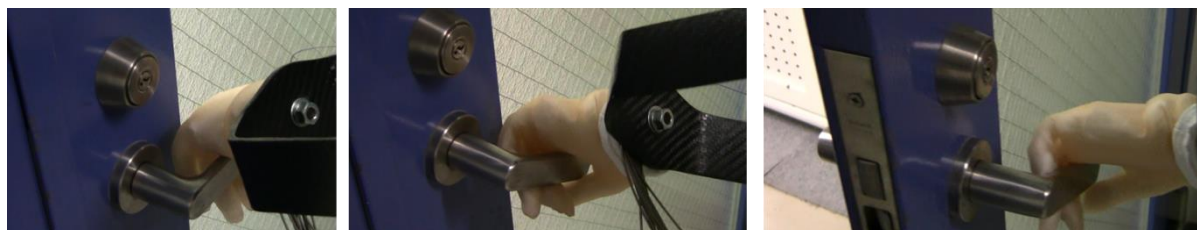


Fig.5.11 ドアを開く(引いて開ける)の様子



Fig.5.12 お盆の操作の様子



Fig.5.13 重量物の持ち上げの様子



Fig.5.14 スライド&ピックの様子

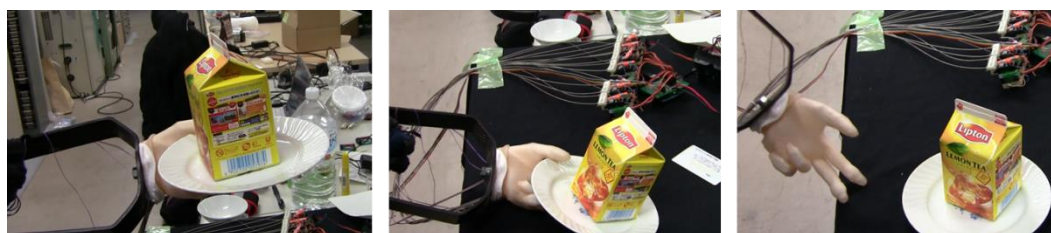


Fig.5.15 平皿の把持及び配置の様子

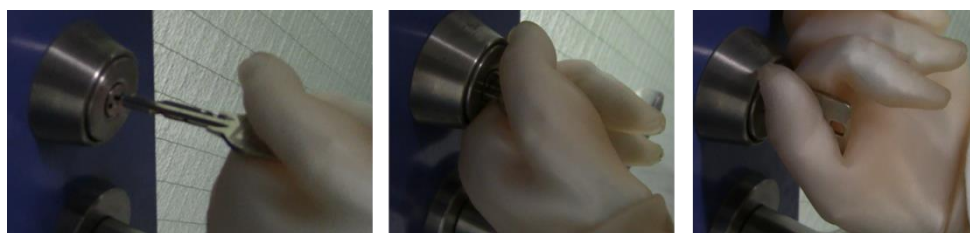


Fig.5.16 鍵の開閉の様子



Fig.5.17 文字書き動作の様子

5.5.3 考察

実験の結果から、本実験で行ったタスクにおいて十分に実行できる能力があることが分かった。

握力把握で行うドアを開く動作では、ドアノブを握りこんだ状態で外力がかかった時の指形状の保持が行われていることが確認できる。これは、指先まで保持トルクの伝達が行われていることが考えられ、ピッキングとは違う重量物の押し引きにおいてより大きな発揮力を持つことが言える。これは鉤握りによる重量物の持ち上げ動作にも言え、2kgの物体を安定して持ち上げることができることから言える。

握力把握・伸展型で行ったお盆の操作では、ロボットハンドのみで1kgの重りを支えることができており、母指に大きな保持トルクがあることが言える。また、この時示指や中指にも大きいねじりモーメントがかかっているにもかかわらず関節はリジッドな状態を維持していることから、関節の剛性がお盆操作の実現に寄与していることが考えられる。一方で、バランスを崩した時に衝撃的に発生した過大なねじりモーメントに対しては関節が脱臼しており、お盆を取り落している。これは重量物を載せるお盆の把持動作において安定性が高くないことを示すと同時に、脱臼によって関節の保護を行う機能がロボットハンドに実装した状態でも備わっていることが確認できる。

スライド&ピックのタスクでは指が劣駆動であることを利用し、押し付けた指が伸展側に動作することで安定した物体の手繰り寄せを実現している。また、そのまま把持動作への移行も行えていることから、ピッキングが出来なかった薄板においてロボットハンドのみでのピッキングを可能にする動作であることが言える。

皿の把持動作及び鍵の開閉動作は、関節に大きくねじりモーメントがかかる側面把握において、更に大きく負荷をかけて行うタスクである。しかしこれらにおいても関節はリジッドな状態を保ち、両タスクを実現している。このことから十分な関節の剛性を持つことが言える。

また、文字書き動作のようにねじりモーメントの大小や向きが大きく変わるタスクにおいても安定した把持が行えていることから、全方向のモーメントに対して剛性を獲得していることが言え、靱帯機構の全方向性が実際の機構においても機能していることが言える。

以上の事から、衝撃的に発生したねじりモーメントに対してフォースリミッタ機構が働いてロボットハンドの関節破壊を防止する機能を備えていることを確認できた一方で、開発した靱帯機構およびフォースリミッタ機構がロボットハンドの関節をリジッドな状態に保ち続けており、タスク実行においてロボットハンドの機能向上に寄与していることが言える。

5.6 関節機構性能評価のまとめと考察

前節までの実験を通して、開発した関節機構を実装したロボットハンドが把持やタスクの実行において機能向上に寄与していることが確認できた。

本節では、これらの考察をまとめ、関節機構の性能評価を行う。

フォースリミッタ機構の座屈荷重では、関節が破壊する前に座屈することを確認し、関節破壊防止を実現し、かつ把持機能などの実現を示唆した。

把持能力試験では、静的な物体把持においては安定した物体把持が行えることを確認し、静的把持において関節の剛性が不足していないことを確認した。

ピック&プレイス実験では物体のアプローチに対して多くの物体に応じたピッキングが可能であり、移動タスクにおいても安定して把持できていることを確認し、関節の剛性が十分であることを確認した。

タスク実行実験では動的なタスクにおいて十分な関節剛性を備えていることと、衝撃的に発生した過負荷に対してもフォースリミッタ機構が動作して関節の破壊を防止していることを確認した。

以上の事から、関節機構が過負荷時に脱臼するために物体の把持が行えないものではなく、全方向のねじりモーメントにおいても様々な負荷のかかり方において関節は常にリジッドな動作を行った。このことから開発した関節機構が日常生活で使用するものにおいて十分な剛性を備えていることが言え、すべり関節を使用した五指型ロボットハンドにおける把持機能、タスク実行機能の機能を向上したことが言える。

それと同時にフォースリミッタ機構が多数回に及ぶ使用に対しての耐用性が分かり、かつ衝撃的な過負荷にも発動することから、予期せぬ過負荷に応じて発動し、関節破壊を防止することも確認できた。

したがって開発した関節機構が十分な関節の剛性を持ち、かつ過負荷時には関節を脱臼させて関節の破壊を防止すること、除荷によって超弾性合金が元の形状に復帰し、関節の機能を回復していることが確認でき、関節機構によってロボットハンドの把持機能の向上と耐故障性の獲得が行えることが分かった。

5.7 おわりに

本章では、開発した関節機構や関節機構を実装した五指型ロボットハンドの実験を通じて開発した関節機構が及ぼす影響について調べ、実験結果から関節機構の評価を行った。

5.2 節では、フォースリミッタ機構の座屈荷重について実験を行い、座屈荷重、最大ひずみ量ともに適切に設定されていることを確認した。

5.3 節では、多様な物体における把持機能試験を行い、開発した関節機構が十分に剛性を備えており、把持機能の向上に貢献していることを確認した。

5.4 節では、多様な物体におけるピック&プレイス実験を行い、多くの物体に対してアプローチ可能であることを確認した。

5.5 節では、関節に負荷のかかるタスクにおけるタスク実行実験を行い、その結果日常のタスクを行うことに対して十分な関節の剛性を備えていることを確認した。

5.6 節では、5.2 節から 5.5 節までの実験を通して得られた結果から関節機構の性能評価を行った。

第6章 結論

6.1 結論.....	66
6.2 今後の展望.....	67

6.1 結論

近年、小型かつ多自由度関節のロボットハンドの発展が目覚ましく、様々な分野での需要が高まっている一方で、ロボットハンドが故障することが問題となっている。本論文では、大きく負荷のかかり破損しやすい部位が関節であることに着目し、把持機能の向上と耐故障性を獲得した関節機構の開発を行った。

本論文では具体的に下記の2つを実現した。

- (1)負荷の大きさに応じて選択的に動作を変え、低負荷時には高い剛性を備えたすべり関節、過負荷時には脱臼して関節を保護し、除荷によって関節機能の回復を行う小型関節機構の開発
- (2)開発した関節機構を実装して、把持能力やタスク実行能力を向上し、耐故障性を獲得させた小型の五指型ロボットハンドの開発

第2章では、ロボットハンドで行われる把持動作から関節にかかる負荷を動作ごとに明らかにし、開発する関節機構の形状やサイズ、必要な関節の剛性、耐久性などの要件を決定した。また、ロボットに使用される関節の種類とその特徴を述べ、開発する関節機構で使用する関節を決定した。

第3章では、2章で述べた目標を達成するために、実際に開発した機構の提案を行い、その概要の説明とモデル化を行った。靱帯機構ではリジッドな関節を持つすべり関節を実現し、超弾性合金の座屈を用いたフォースリミッタ機構によって関節破壊を防止した。また、超弾性合金の座屈荷重や最大ひずみ量のモデル化によって適切な設計を可能にした。

第4章では、3章で説明した機構を実際に試作し、低負荷時のリジッドな動作、高負荷時の脱臼による関節の保護、除荷による自動回復が行われることを確認し、開発した関節機構を小型の五指型ロボットハンドに実装した。また開発した関節機構、ロボットハンドがサイズや重量の要件を満たしていることを確認した。

第5章では、開発した関節機構や五指型ロボットハンドの性能評価を行った。

フォースリミッタ機構の座屈荷重測定実験では、必要な関節の剛性と関節破損時の荷重の間に座屈荷重を設定できていることを確認し、把持機能と関節破壊防止機能を有することを確認した。また、多数回に及ぶ使用においても座屈荷重が低下せず、除荷による超弾性合金の形状復帰がなされていることを確認した。

把持機能試験、ピック&プレイス実験、タスク実行実験では、日常で行うこれらの行為において開発した五指型ロボットハンドが十分な関節の剛性を備えており、開発した関節機構が把持機能向上に寄与していると同時に衝撃的な過負荷に対しても有効であり、関節保護の機能を十分に備えていることを確認した。

以上により、高い関節の剛性と高い耐久性を備えた関節機構を実現し、五指型ロボットハンドにおいて十分な把持機能を実現できることを確認した。

6.2 今後の展望

開発した関節機構によって高い剛性と耐久性を実現したが、機構の実装が困難という点で課題が残っている。靱帯機構やフォースリミッタ機構を実際に開発する場合、ある程度の張力がワイヤにかかっている必要があるが、ワイヤの結合や機構の実装、フォースリミッタ機構などの様々な条件で緩みが発生してしまうという問題がある。したがって、制作及び実装の容易化のためには、ロボットハンドの掌内部に設置できるような小型の調弦機構などを開発し、ワイヤの緩みを解消する機構の開発を行うことが必要である。

また本論文では、1 関節に対して 1 つの靱帯機構、フォースリミッタ機構を適用した関節機構を開発したが、提案した機構は 1 つ機構を複数の関節に跨いで使用することも可能である。したがって、1 つの機構を複数関節に適用した時にどのような影響を及ぼすか、調査することなどが今後の展望として考えられる。

参考文献

<和文文献>

[日本ロボット学会 2013]

日本ロボット学会:”特集「人間環境と親和性の高いロボットのためのアクチュエータ」”, 日本ロボット学会誌, 31 巻, 6 号, p.p.1-35, 2013

[小川 2005]

小川 透, 永谷 圭司, 田中 豊:”衝突時に物体や事故の破壊を防ぐロボットアーム用ディスロケーション関節の開発”, 日本機械学会論文集(C 編), 71 巻, 705 号, p.p.1638-1645, 2005

[SQUSE 2011]

“FH-1000”

<http://www.squse.co.jp/product/detail.php?id=6>

[矢吹 2014]

矢吹 佳子, 星川 英, 雍 旭, 景 暁バイ, 中村 達弘, 棚橋 一将, 石原 正博, 關 達也, 加藤 龍, 横井 浩史:”エラストマーゲルを用いた筋電義手のための装飾用グローブの開発”, 第 30 回日本技師装具学会学術大会講演集, p.p.151, 2014, 岡山

[河内 2012]

河内まき子:”AIST 日本人の手の寸法データ”

<http://riodb.ibase.aist.go.jp/dhbodydb/hand/index.html>, 2012

[田中 2012]

田中 啓太, 中川 慎也, 關 達也, 加藤 龍, 横井 浩史:”乳幼児及び小児のための多自由度筋電義手の開発”, 日本機械学会 2012 年度年次大会, J154013, 2012, 石川

[日本機械学会 2011a]

日本機械学会:”機械実用便覧 改訂第 7 版”, 丸善出版株式会社, p.p.162, 2011

[岩熊 2014]

岩熊 哲夫, 小山 茂:” 鬆徒勞苦衷有迷禍荷苦痛 構造と連続体の力学基礎を独習する”, p.p.213-223

[日本機械学会 2011b]

日本機械学会:”機械実用便覧 改訂第 7 版”, 丸善出版株式会社, p.p.261-262, 2011

[古川 1997]

“技術資料「古河 NT 合金(形状記憶合金・超弾性合金)について」”

<https://www.furukawa-ftm.com/nt/library.htm>

[三田 2010]

三田 俊裕, 川島 捷宏, 三角 正明, 大久保 雅文.”TiNi 形状記憶合金のポアソン比とヤング率の電磁超音波法による測定”

[長尾 1971]

長尾 竜郎.”手指動作の研究(第 1 報)”, 日本リハビリテーション医学会誌, vol.8, no.1, p.p.3-12, 1971

[高澤 2013]

高澤 駿介, 田中 啓太, 關 達也, 望月 大二郎, 中村 達弘, 加藤 龍, 横井 浩史.”多様な把持形態が実現可能な筋電義手のためのワイヤ干渉駆動型母指機構の開発”, 日本機械学会 2013 年度年次大会, J151034, 岡山, 2013

< 英文文献 >

[Kaneko 2009]

Kenji KANEKO, Fumio KANEHIRO, Mitsuharu MORISAWA, Kanako MIURA, Shin'ichiro NAKAOKA, and Shuuji KAJITA: "Cybernetic Human HRP-4C", 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2009, Paris, France

[TouchBionics 2012]

"i-limb ultra"

<http://www.touchbionics.com/products/active-prostheses/i-limb-ultra/>

[Hirose 2013]

Toshinori Hirose, Takeshi Ando, Soichiro Fujioka, and Osamu Mizuno: "Development of Head Care Robot using Five-bar Closed Link Mechanism with Enhanced Head Shape Following Capability", 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013, Tokyo, Japan

[Ashish 2013]

Ashish D. Deshpande, Zhe Xu, Michael J. Vande Weghe, Benjamin H. Brown, Jonathan Ko, Lillian Y. Chang, David D. Wilkinson, Sean M. Bidic, and Yoky Matsuoka: "Mechanisms of the Anatomically Correct Testbed Hand", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.18, No.1, 2013

[Mouri 2002]

Tetshya Mouri, Haruhisa Kawasaki, Keisuke Yoshikawa, Jun Takai, and Satoshi Ito: "Anthropomorphic Robot Hand: Gifu Hand III", 11th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding, 2002, Jeonbuk, Korea

[Ottobock 2012]

"Michelangelo"

<http://www.living-with-michelangelo.com/gb/home/>

[DLR 2011]

"DLR hand"

<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/humanoids/dlr-super-robust-robot-hand>

[iRobot 2012]

"iRobot Hand"

<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-hardware/irobot-smashes-its-new-robotic-hand-with-baseball-bat>

[Raymond 2013]

Raymond R. Ma, Lael U. Odhner, and Aaron M. Dollar: "A Modular, Open-Source 3D Printed Underactuated Hand", 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013, Karlsruhe, Germany

[R.F.Chandler 1975]

R.F.Chandler, C.E.Clauser, J.T.McMconville, H.M.Reynolds, J.W.Yound: "Investigation of Inertial Properties of the Human hand", U.S.Department of Transportation, Report No. DOT HS-801 430, pp.72-83, 1975

謝辭

本論文は、電気通信大学大学院 情報理工学研究科 知能機械工学専攻 横井研究室において執筆されたものです。執筆においては多くの方々のご指導とご協力を賜りました。はじめに、

電気通信大学大学院 情報理工学研究科 知能機械工学専攻 教授 横井浩史 先生

に心より、御礼申し上げます。先生の助言によって、研究を進めることが出来ました。先生のもとで研究ができたことに、とても幸せを感じています。熱く御礼申し上げます。

横井研究室 森下壮一郎特任准教授には、論文投稿のたびに理論の組み立てをサポートしていただき、幾度もご指摘をしていただきました。研究においても実験内容や方法、解析の手法や結果の見方などのご指導をしていただくなど、他にもさまざまなことで夜遅くまでご指導いただきました。ありがとうございました。

横浜国立大学 加藤龍准教授には、研究内容の相談に何度も付き合ってください、論文投稿時にもご指導いただきました。ありがとうございました。

電気通信大学 矢吹佳子技術支援員には、生活の事や研究設備の事など様々な場面においてサポートしていただきました。ありがとうございました。

博士3年の關さんには、研究生生活の過ごし方や研究の進め方、理論の固め方など様々なところで助言をいただくなど、常日頃から面倒を見ていただきました。ありがとうございました。

横井研究室同期の佐藤君、鈴木君、雍君とは互いに研究では相談しあい、アイデアを出し合うなど協力し、生活などを互いに支えあいながら過ごしてきました。この2年間の研究室生活を共に生活できたことをうれしく思います。

横井研究室のスタッフ、学生の皆様、研究室での勉学や生活等、様々なところで支えていただきました。深く感謝し、御礼申し上げます。

2015 年 2 月

研究業績

口頭発表

(1) 高澤 駿介, 關 達也, 加藤 龍, 横井 浩史:”ロボットハンドのすべり関節のための自動回復機能を有する靱帯機構の開発”, 第 32 回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2014AC1P3-02

(2) 高澤 駿介, 田中 啓太, 關 達也, 望月 大二郎, 中村 達弘, 加藤 龍, 横井 浩史:”多様な把持形態が実現可能な筋電義手のためのワイヤ干渉駆動型母指機構の開発”, 日本機械学会 2013 年度年次大会, JI51034, 岡山, 2013

ポスターセッション

(1) 高澤 駿介, 横井 浩史:”すべり関節のための自動回復機能を有する関節機構の開発”, The 11th IEEE Transdisciplinary-Oriented Workshop for Emerging Researchers, 東京, 2014

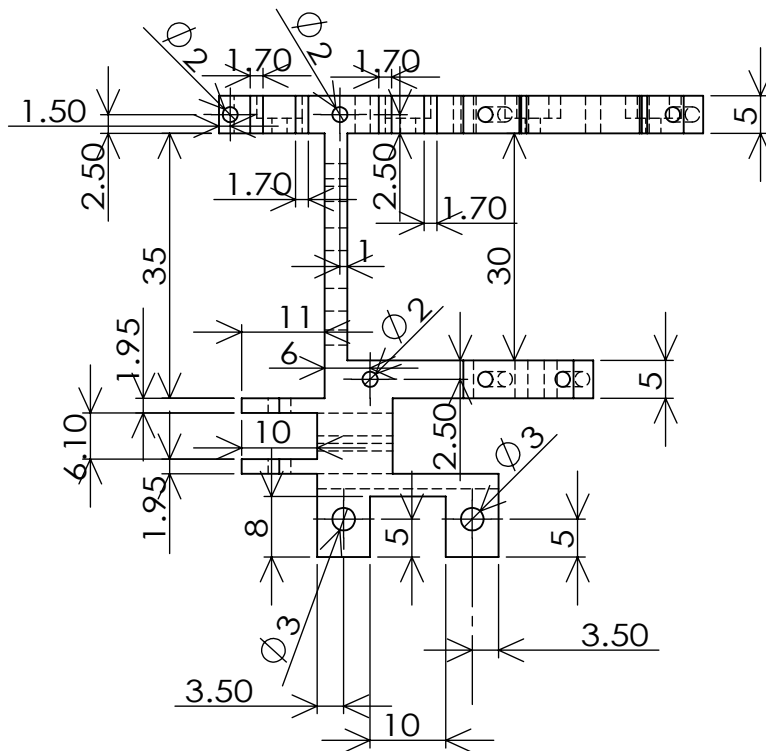
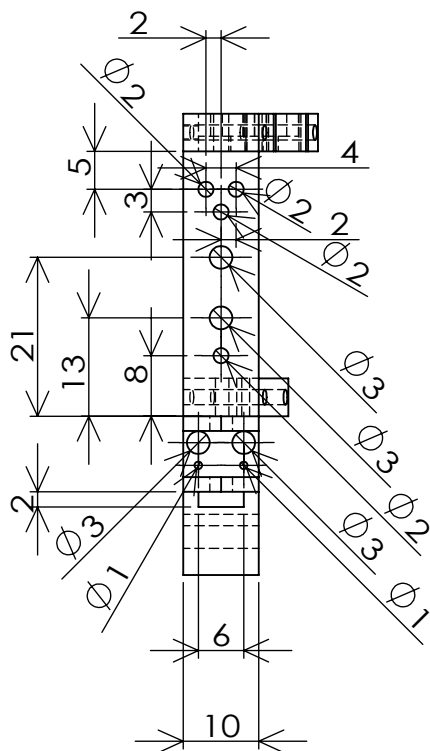
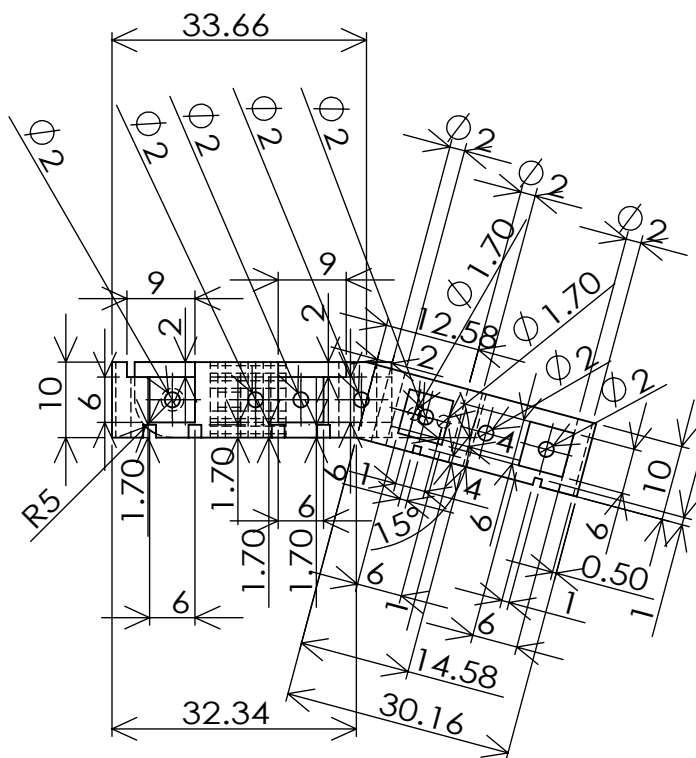
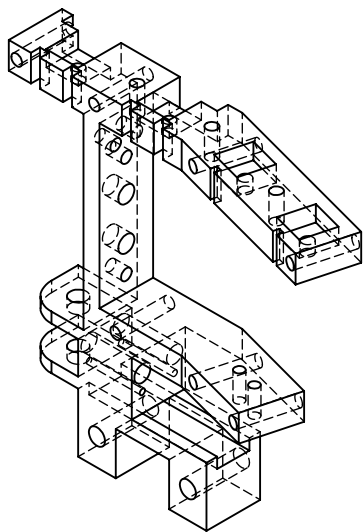
受賞

(1) Outstanding Poster Presentation Award, The 11th IEEE Transdisciplinary-Oriented Workshop for Emerging Researchers, 東京, 2014

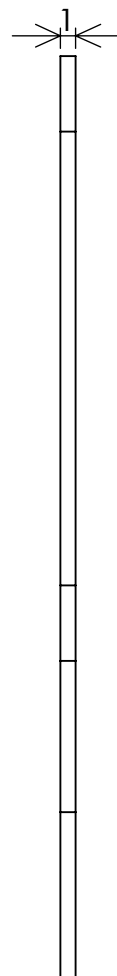
付録

付録 A 五指型ロボットハンド設計図	80
--------------------------	----

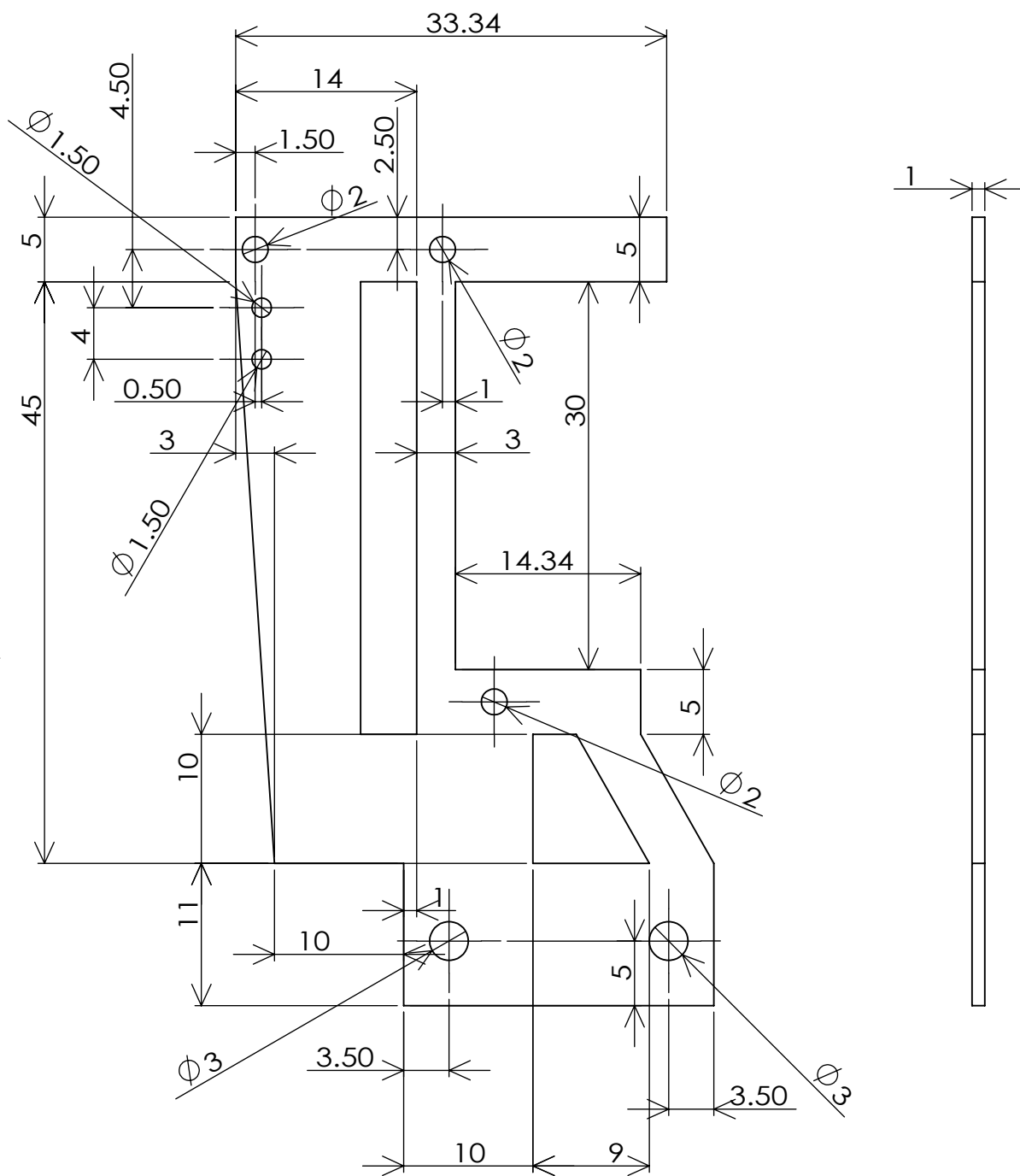
付録 A 五指型ロボットハンド設計図



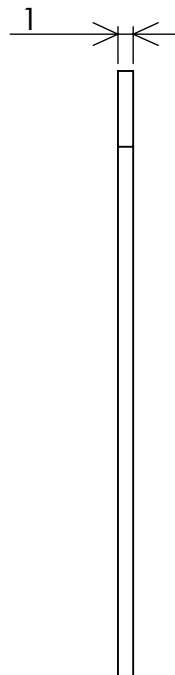
作成者		部品名	
高澤 駿介		掌-芯パーツ	
比率	材料	投影法	部品番号
1:1	ABS樹脂		P-001



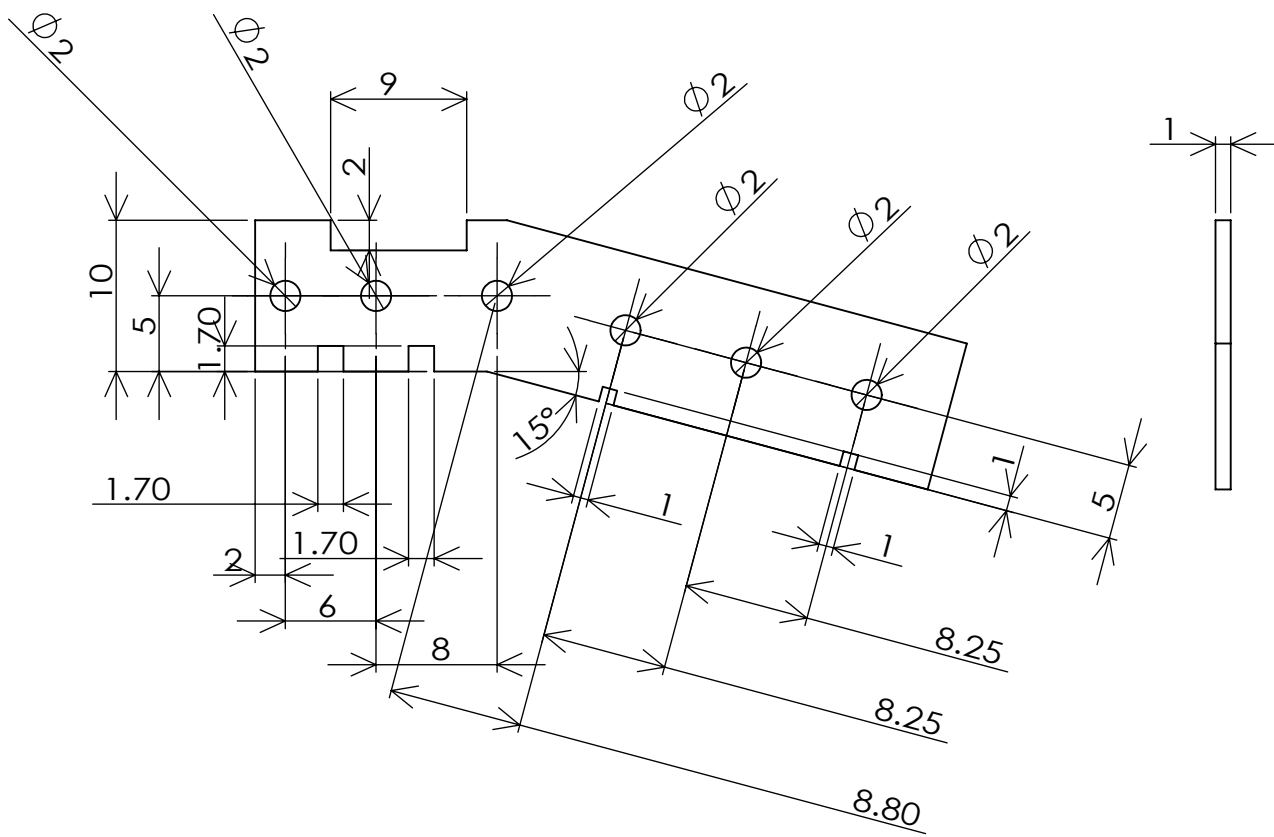
	作成者	部品名	
	高澤 駿介	掌-フレーム1	
比率	材料	投影法	部品番号
2:1	A2017		P-002



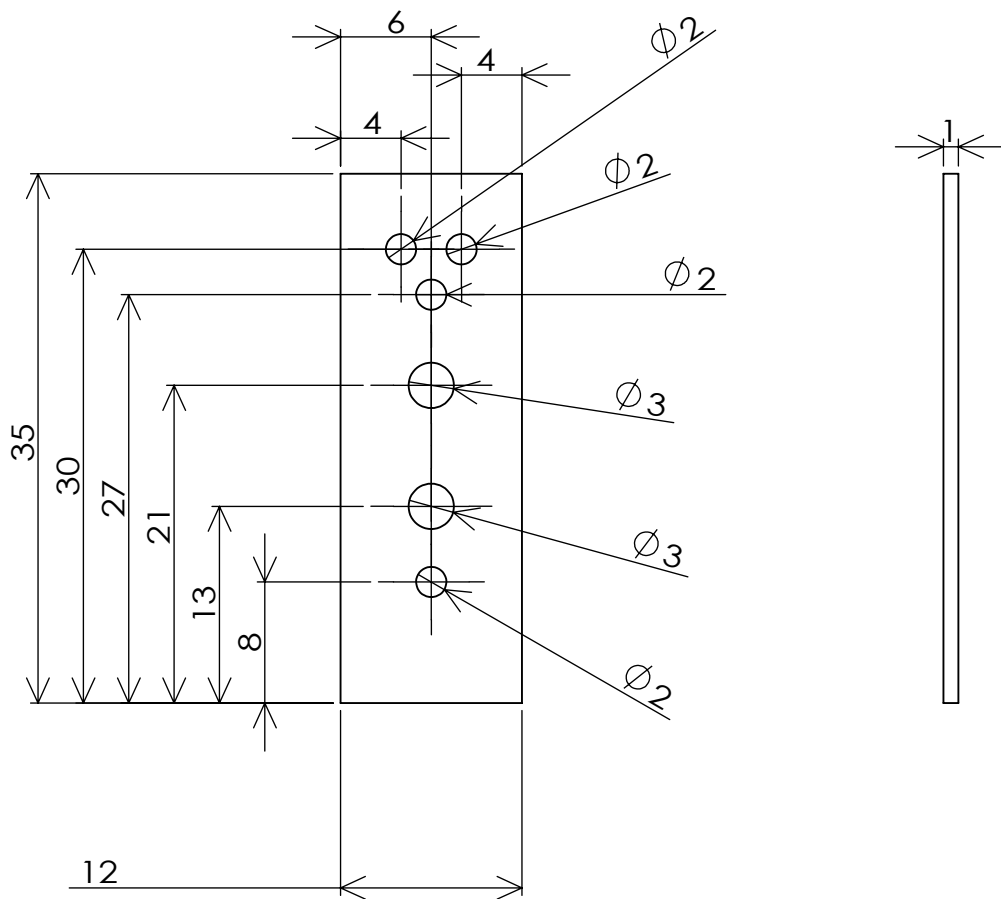
作成者		部品名	
高澤 駿介		掌-フレーム2	
比率	材料	投影法	部品番号
2:1	A2017		P-003



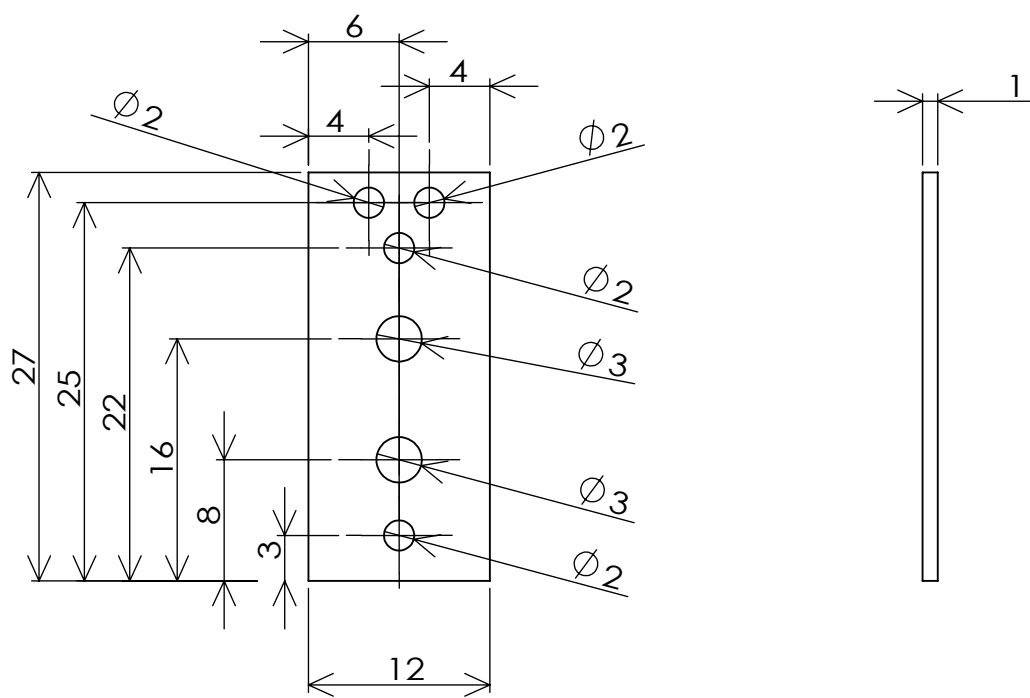
作成者	部品名	
高澤 駿介	掌-フレーム3	
材料	投影法	部品番号
A2017		P-004



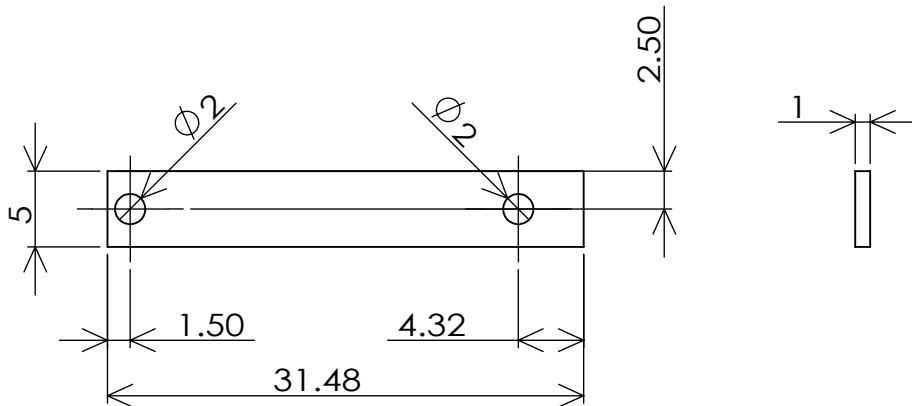
作成者		部品名	
高澤 駿介		掌-フレーム4	
比率	材料	投影法	部品番号
2:1	A2017		P-005



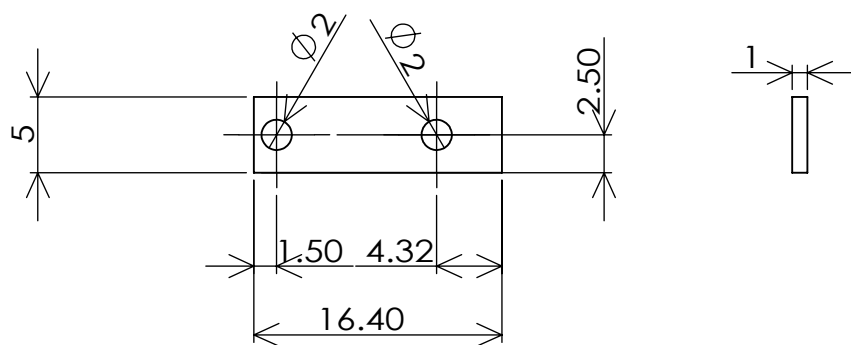
作成者		部品名	
高澤 駿介		掌-フレーム5	
比率	材料	投影法	部品番号
2:1	A2017		P-006



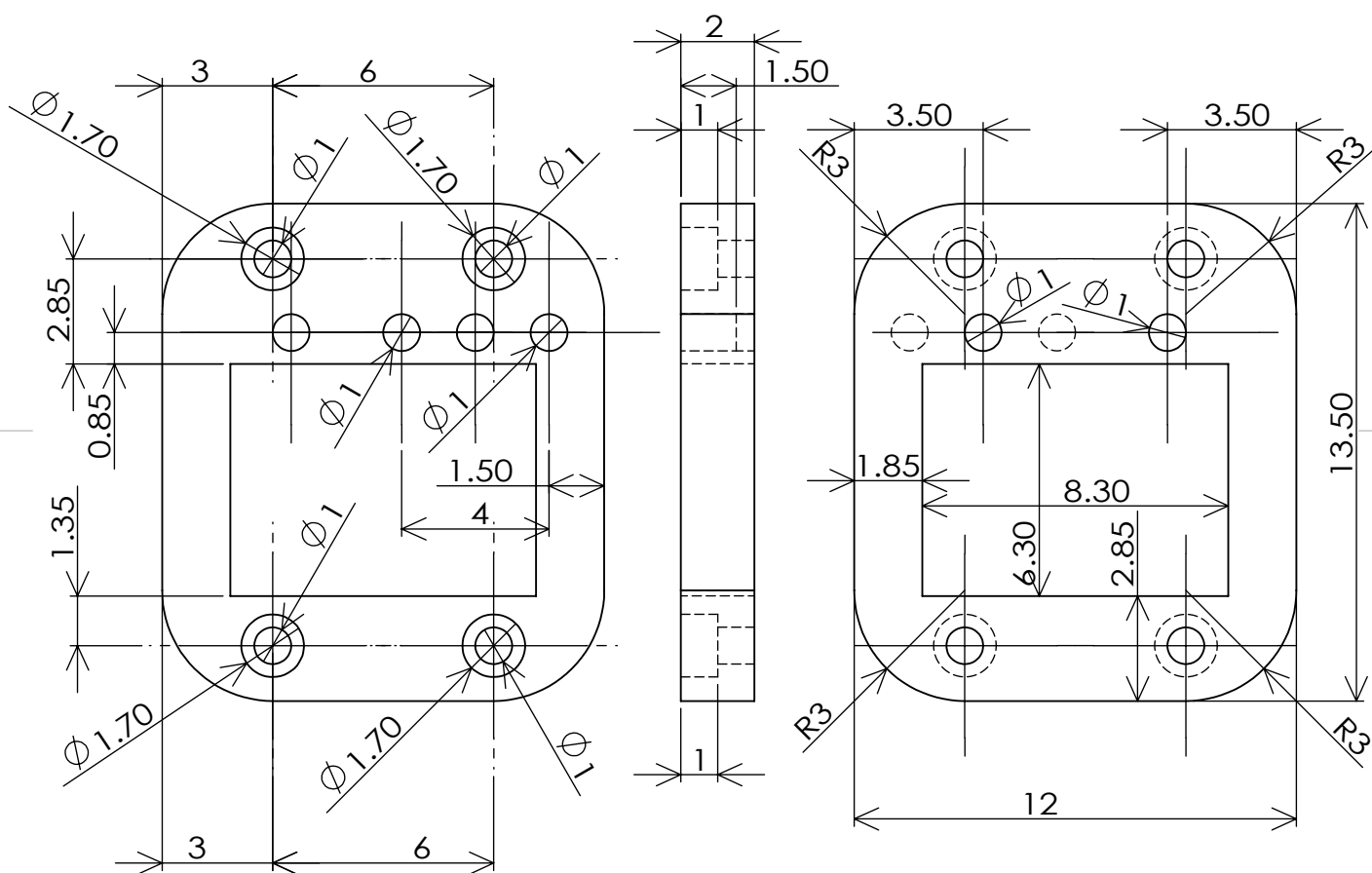
作成者		部品名	
高澤 駿介		掌-フレーム6	
比率	材料	投影法	部品番号
2:1	A2017		P-007



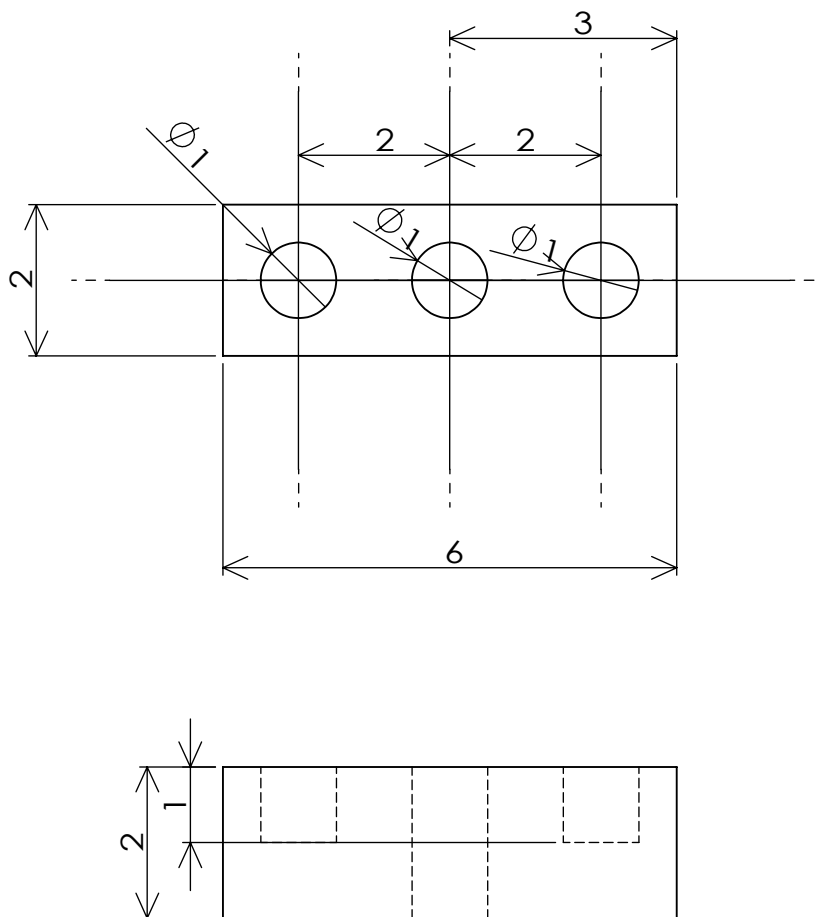
作成者		部品名	
高澤 駿介		掌-フレーム7	
比率	材料	投影法	部品番号
2:1	A2017		P-008



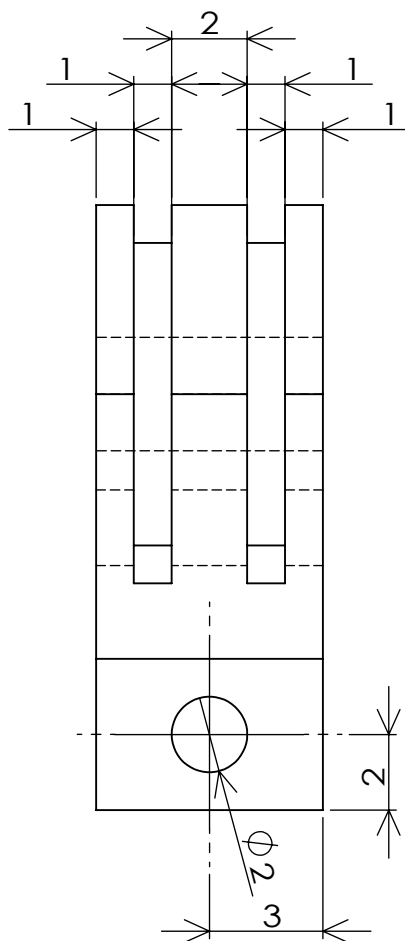
作成者		部品名	
高澤 駿介		掌-フレーム8	
比率	材料	投影法	部品番号
2:1	A2017		P-009



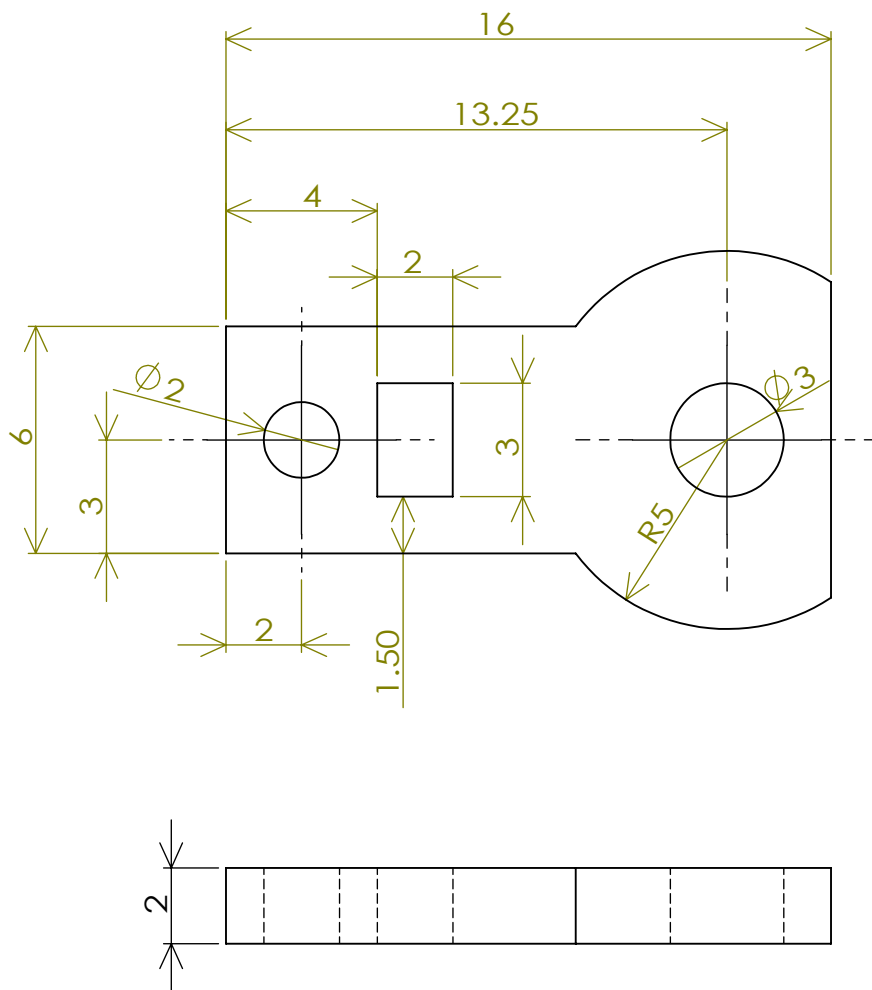
作成者		部品名	
高澤 駿介		示指-キャップ	
比率	材料	投影法	部品番号
5:1	A2017		P-010

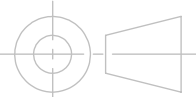


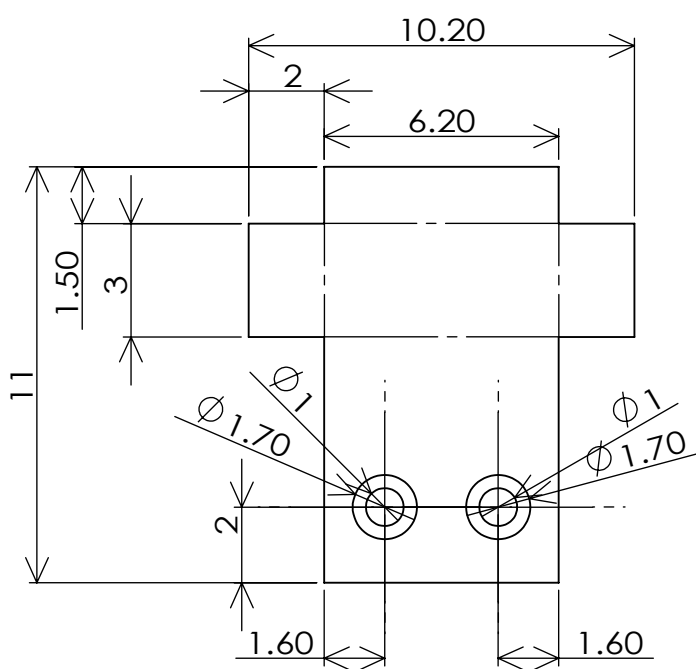
作成者		部品名	
高澤 駿介		キャップ	
比率	材料	投影法	部品番号
10:1	A2017		P-012



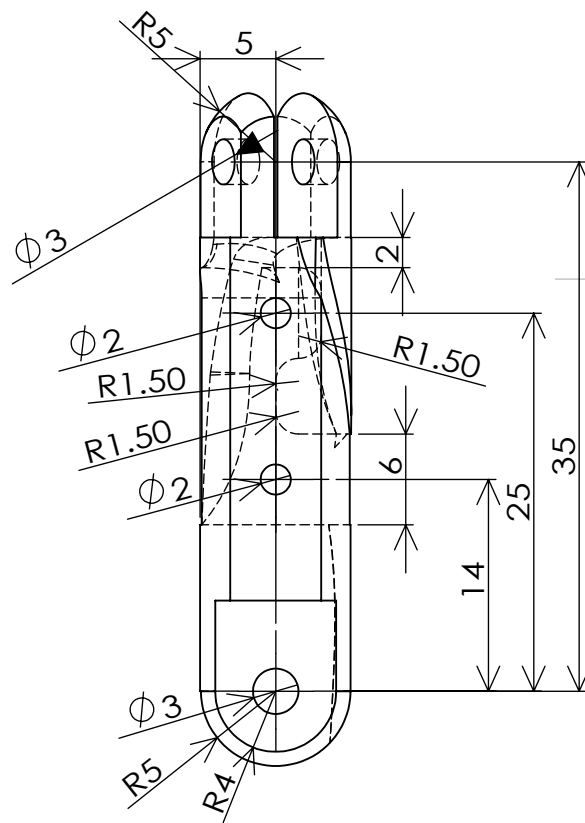
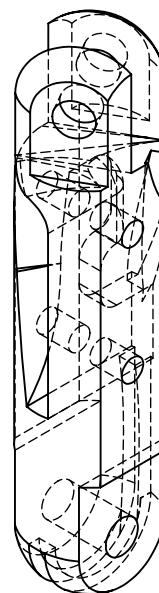
	作成者	部品名	
	高澤 駿介	母指対立リンク 1	
比率	材料	投影法	部品番号
5:1	ABS樹脂		P-013



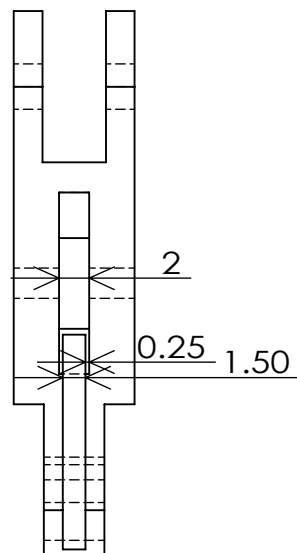
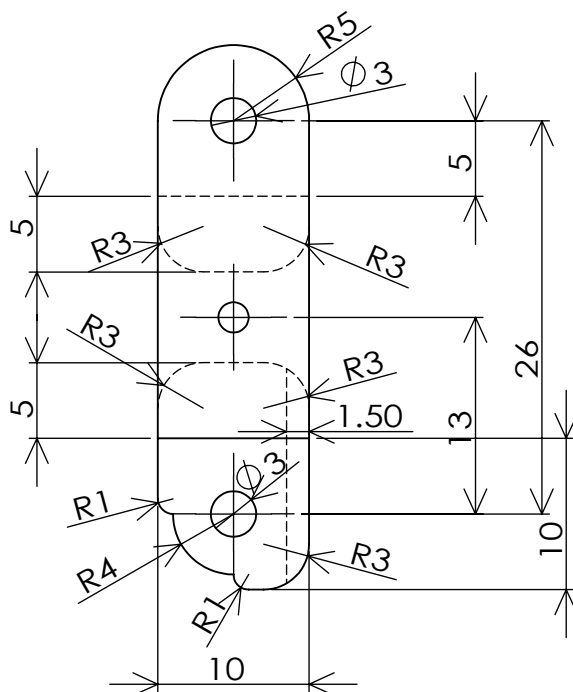
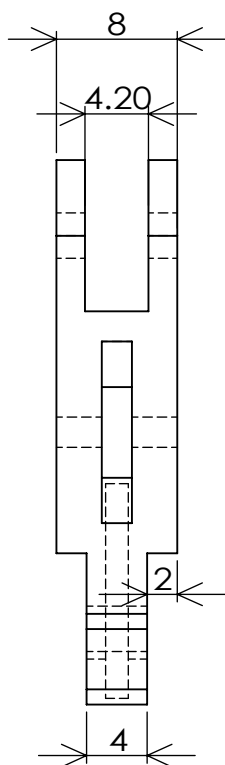
作成者		部品名	
高澤 駿介		母指対立リンク 2	
比率	材料	投影法	部品番号
5:1	A2017		P-014



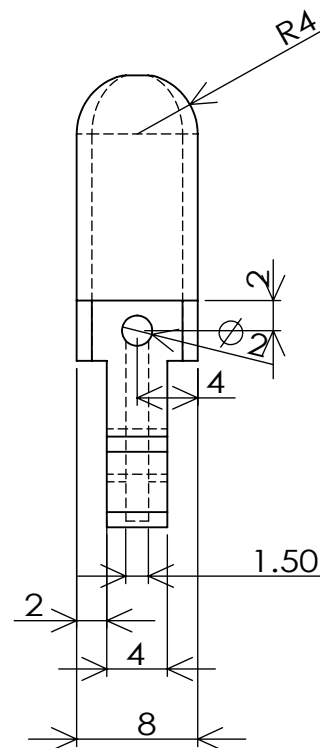
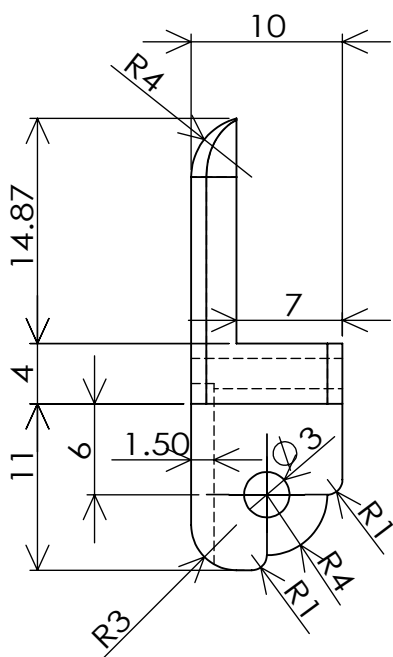
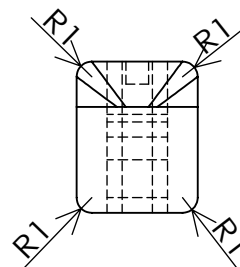
作成者		部品名	
高澤 駿介		母指対立リンク 3	
比率	材料	投影法	部品番号
5:1	A2017		P-015



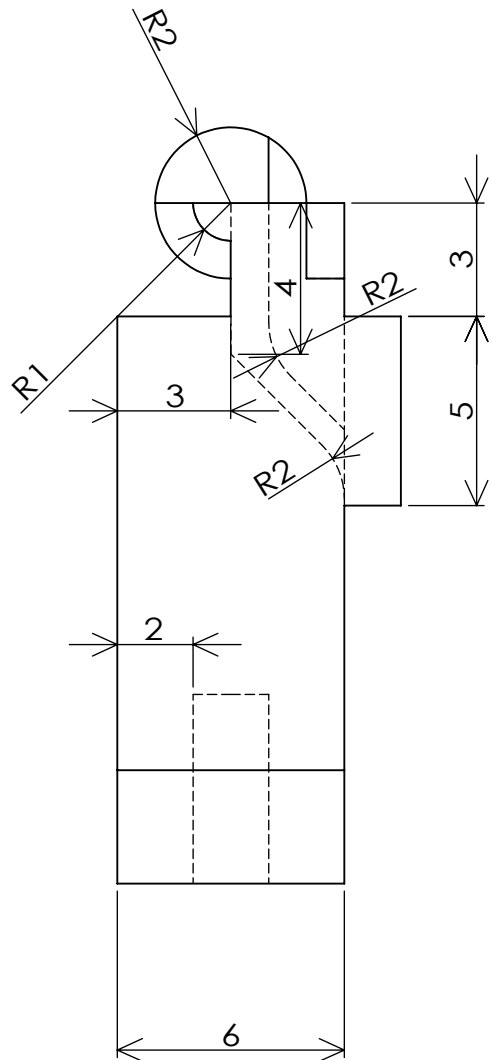
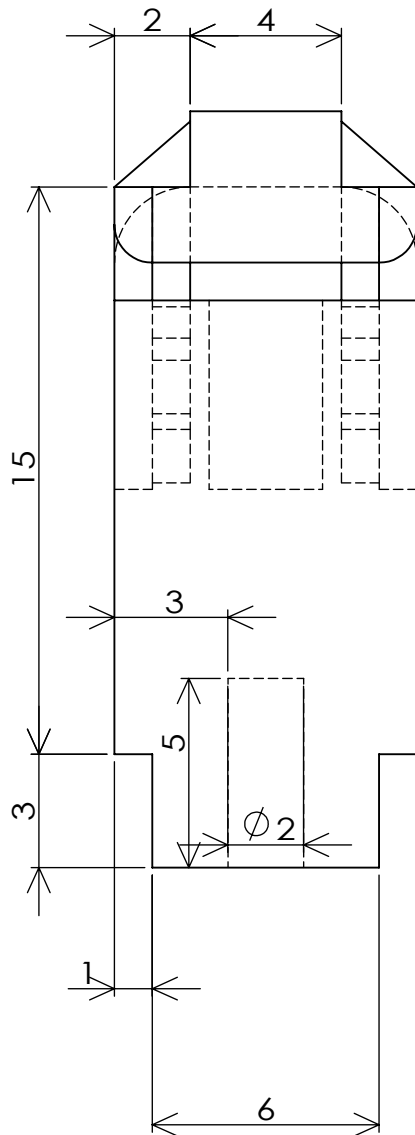
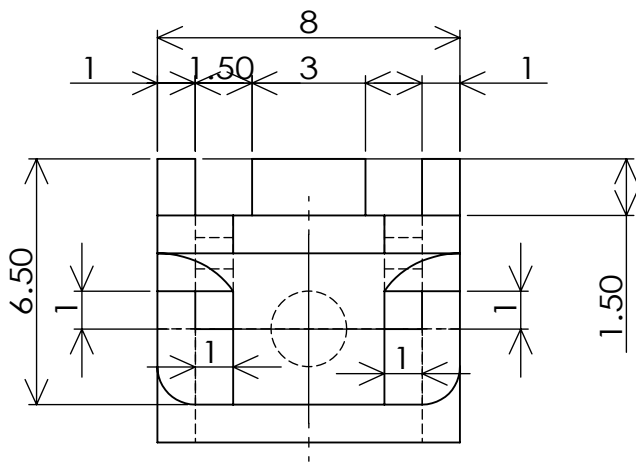
	作成者	部品名	
	高澤 駿介	母指CMリンク	
比率	材料	投影法	部品番号
2:1	ABS樹脂		P-016



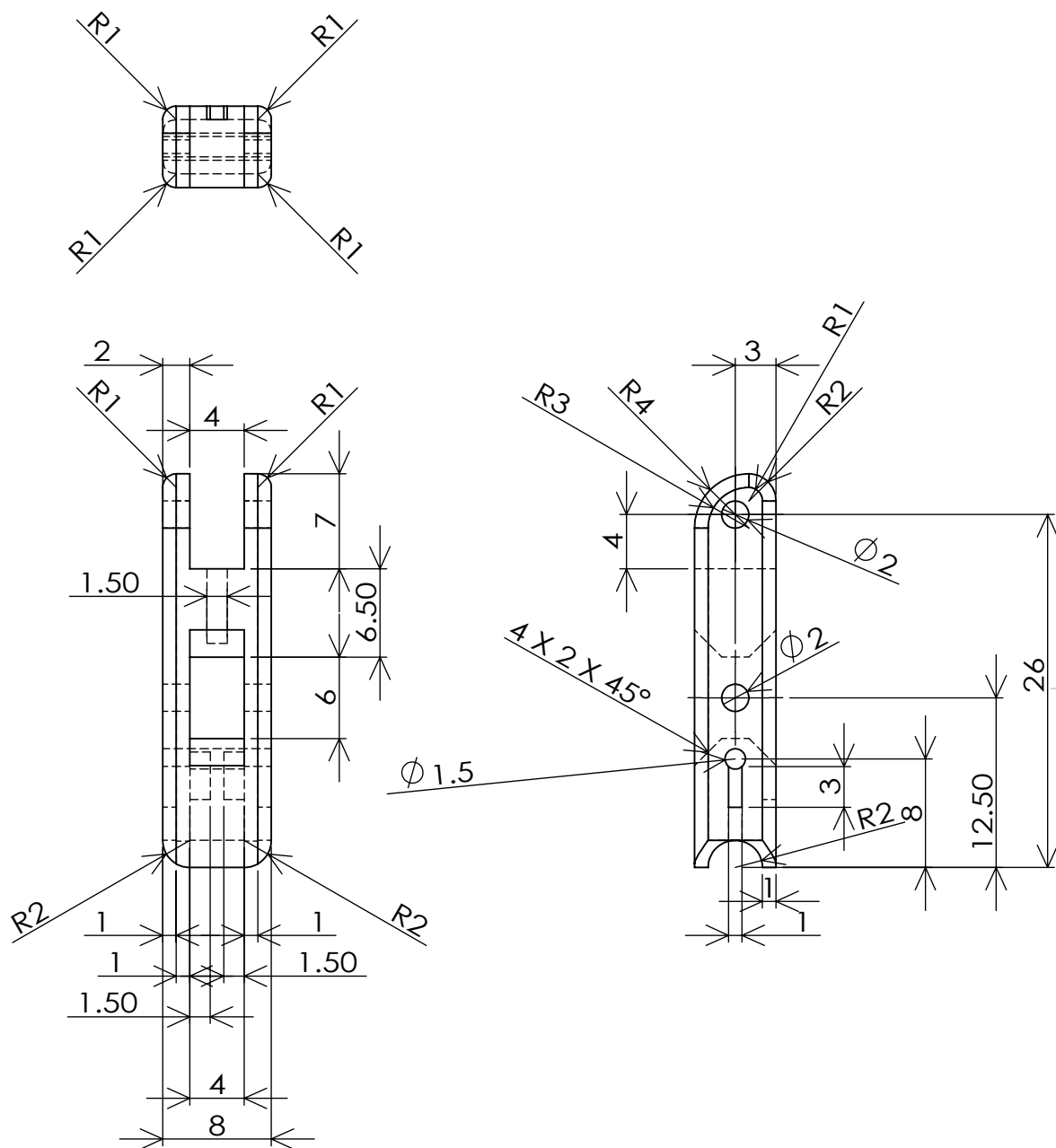
作成者		部品名	
高澤 駿介		母指MPリンク	
比率	材料	投影法	部品番号
2:1	ABS樹脂		P-017

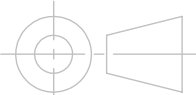


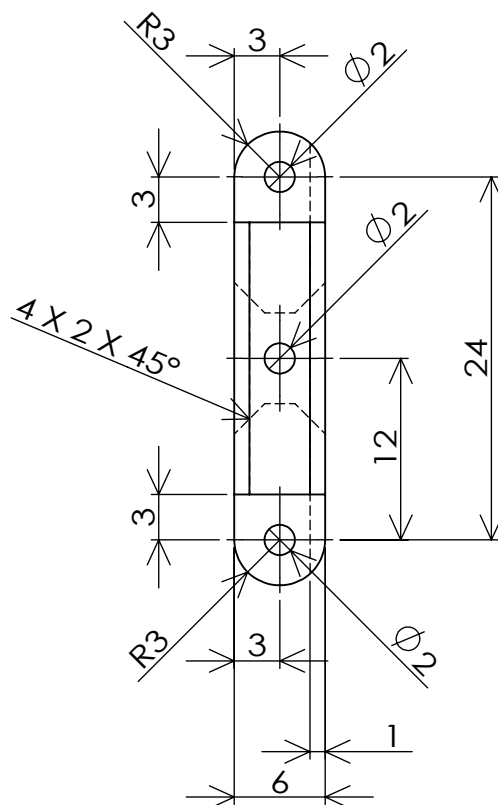
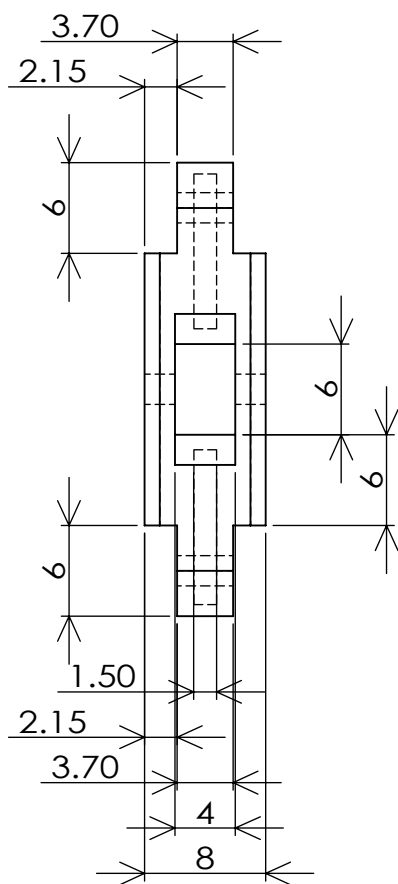
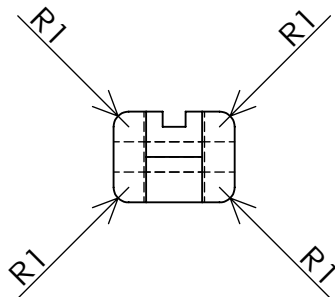
作成者		部品名	
高澤 駿介		母指IPリンク	
比率	材料	投影法	部品番号
2:1	ABS樹脂		P-018



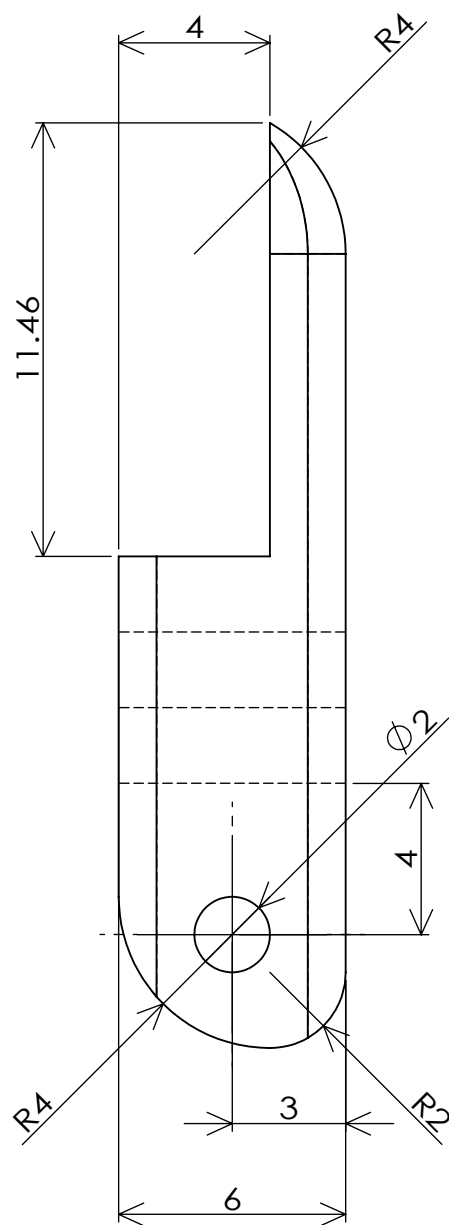
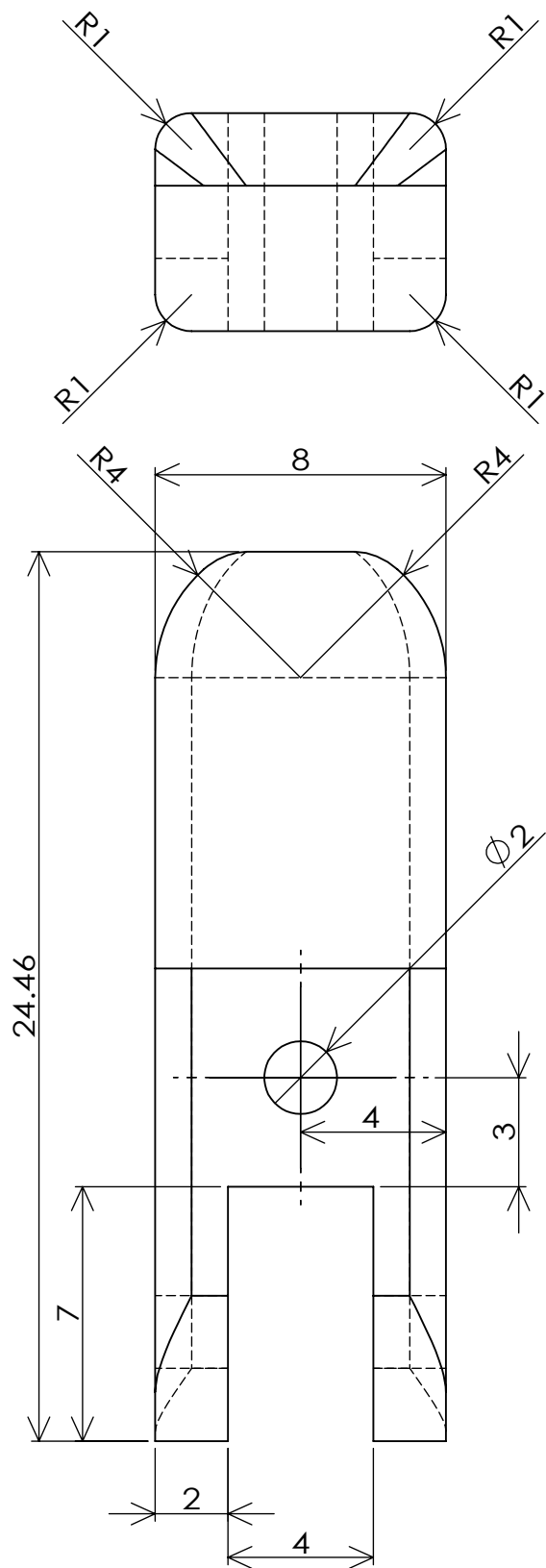
作成者	部品名		
高澤 駿介	示指手根パーツ		
比率	材料	投影法	部品番号
5:1	ABS樹脂		P-019



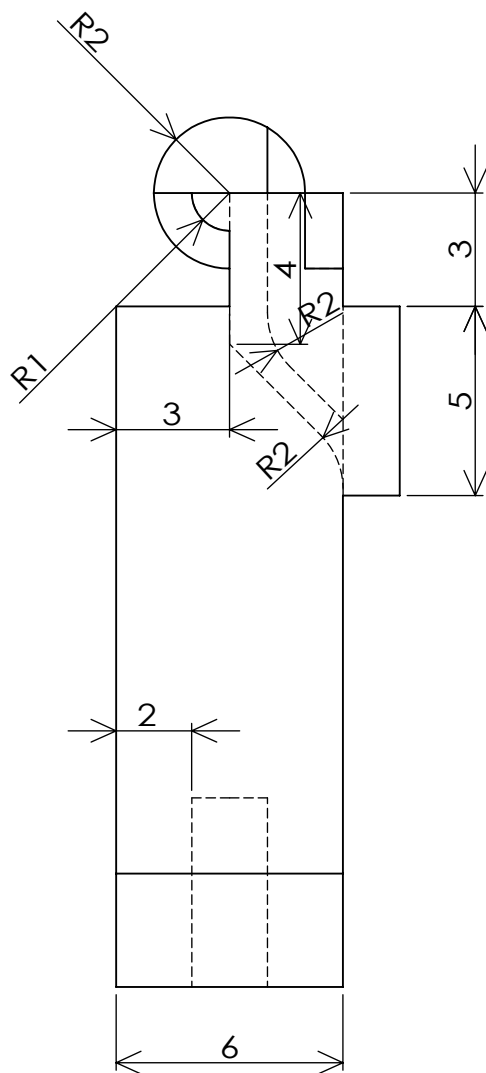
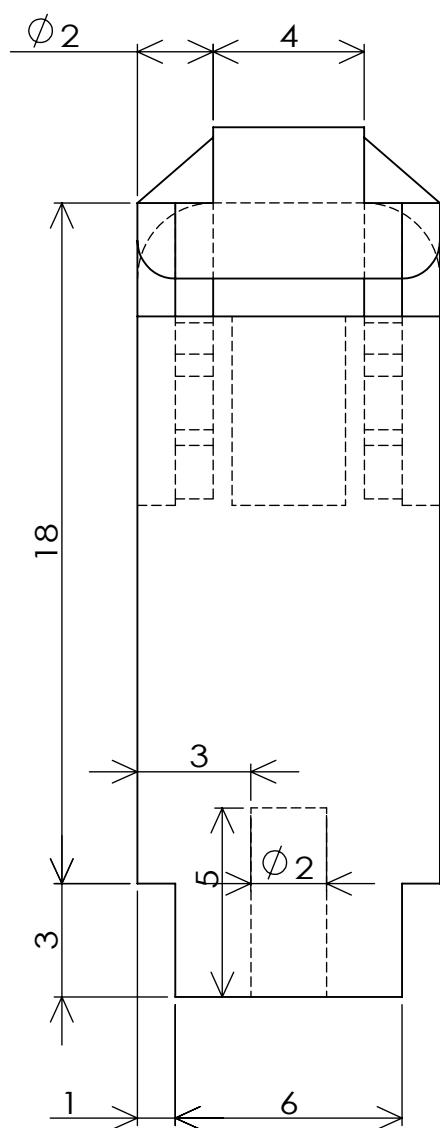
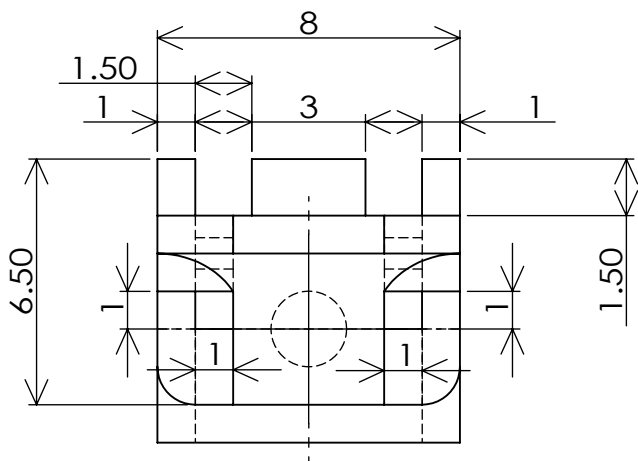
作成者	部品名		
高澤 駿介	示指MPリンク		
比率	材料	投影法	部品番号
2:1	ABS樹脂		P-020



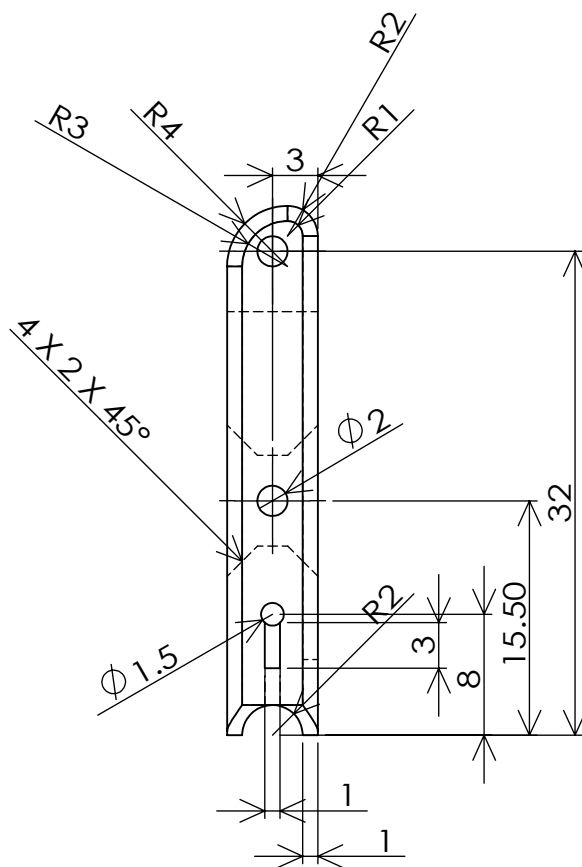
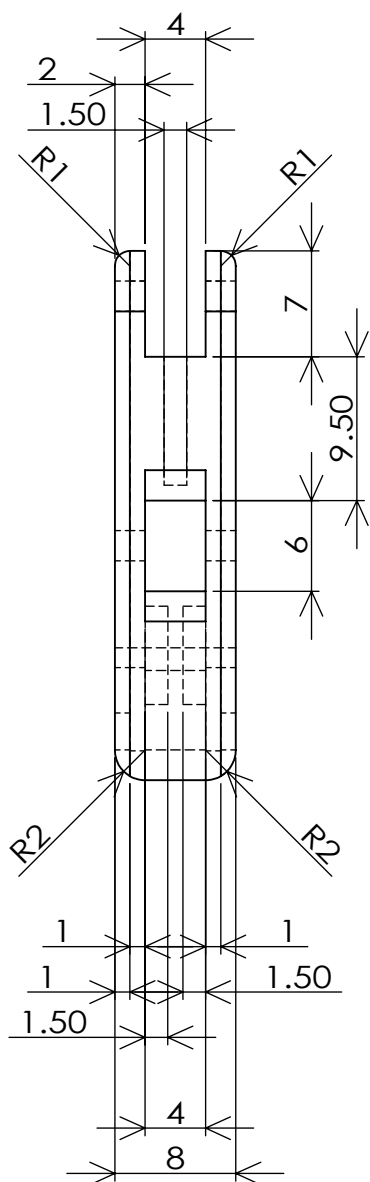
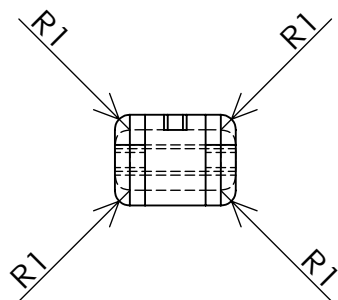
作成者	部品名		
高澤 駿介	示指PIPリンク		
比率	材料	投影法	部品番号
2:1	ABS樹脂		P-021



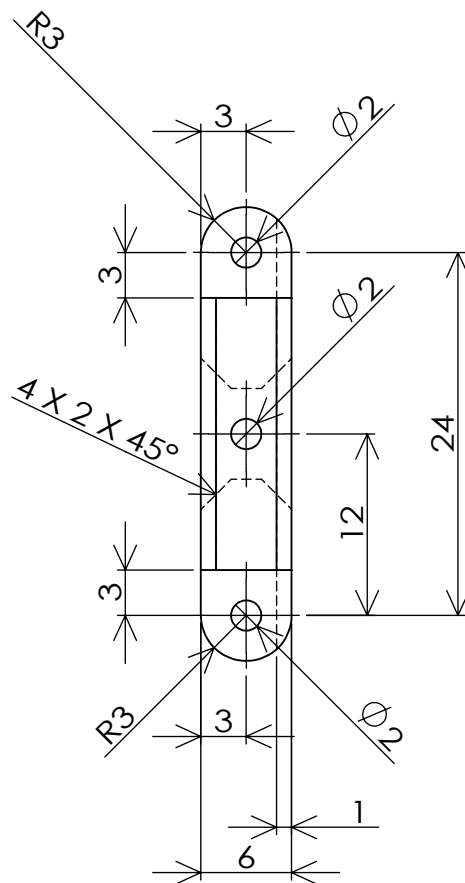
作成者	部品名		
高澤 駿介	示指DIPリンク		
比率	材料	投影法	部品番号
5:1	ABS樹脂		P-022



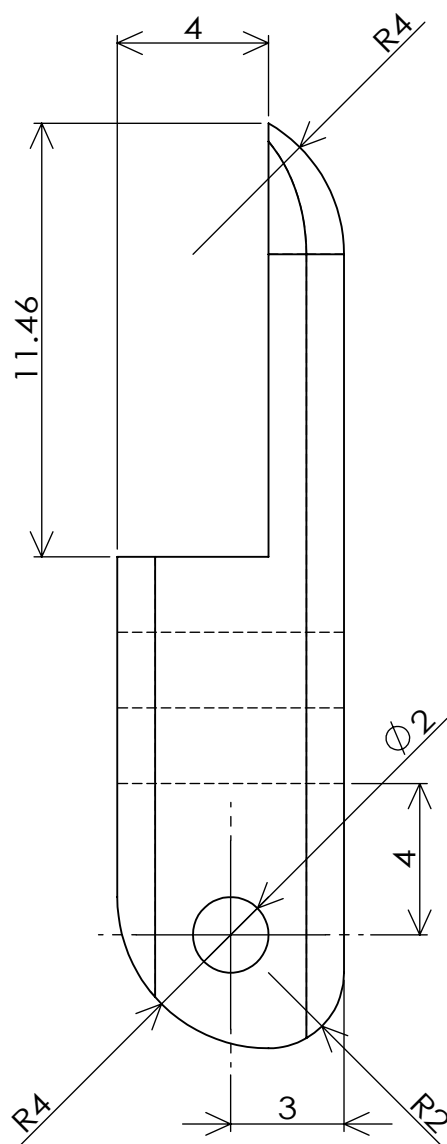
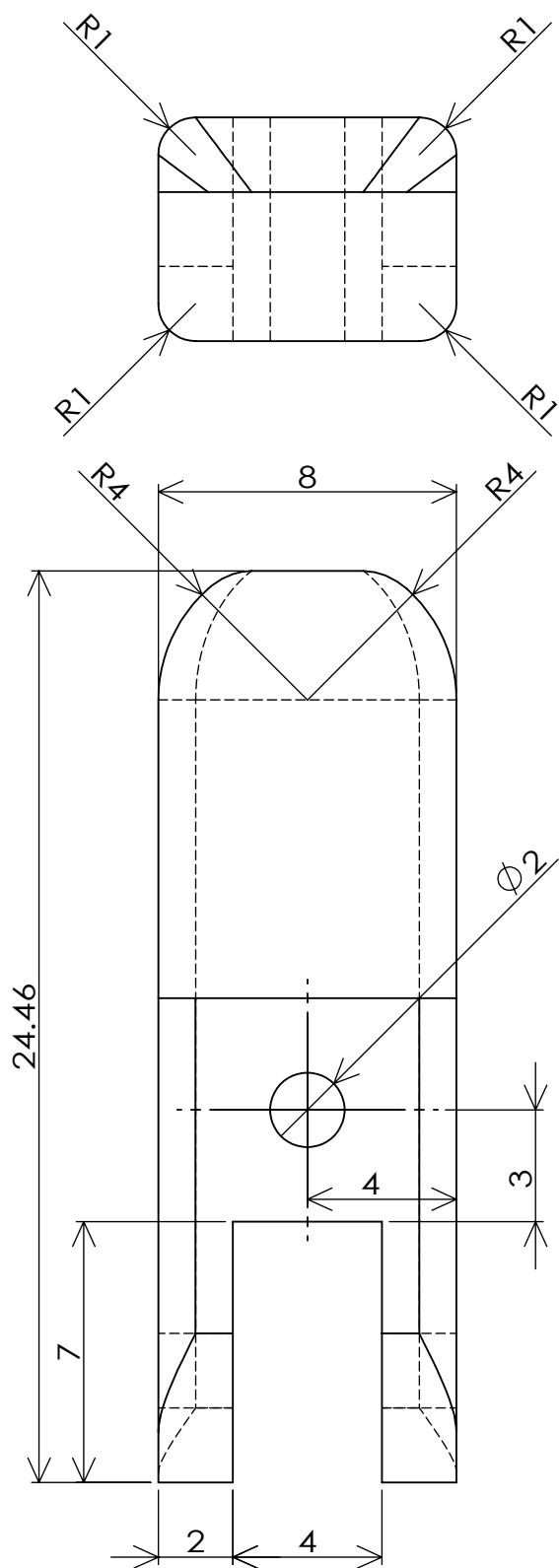
作成者	部品名		
高澤 駿介	中指手根パーツ		
比率	材料	投影法	部品番号
5:1	ABS樹脂		P-023



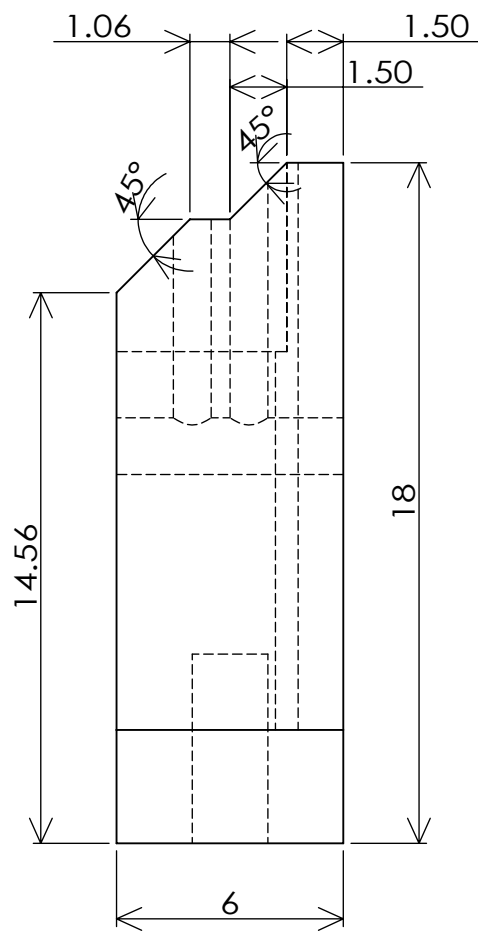
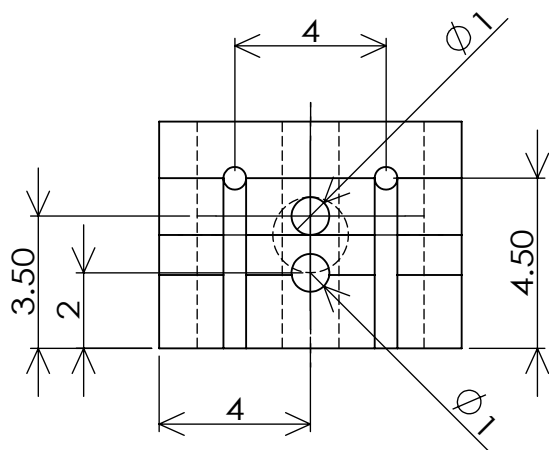
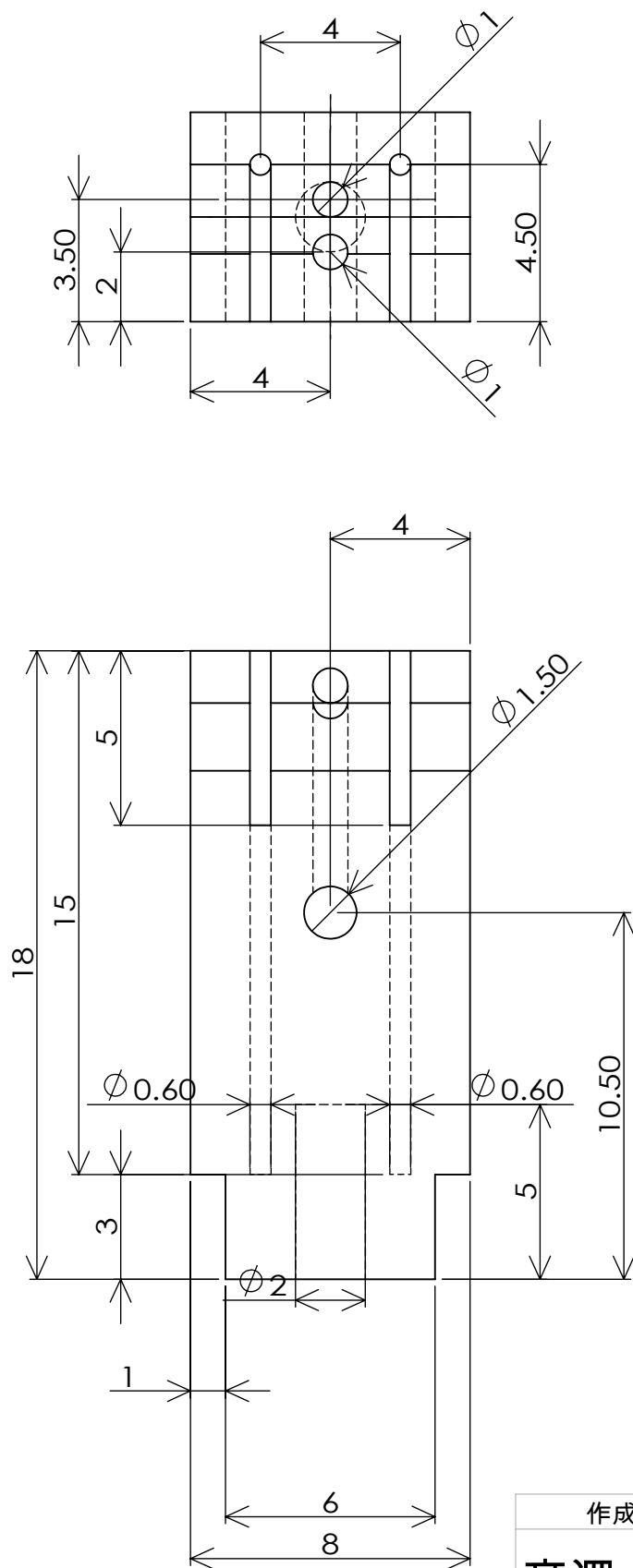
作成者	部品名		
高澤 駿介	中指MPリンク		
比率	材料	投影法	部品番号
2:1	ABS樹脂		P-024



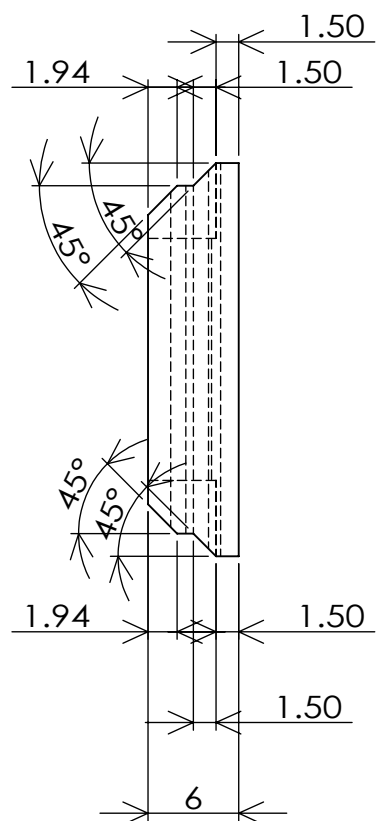
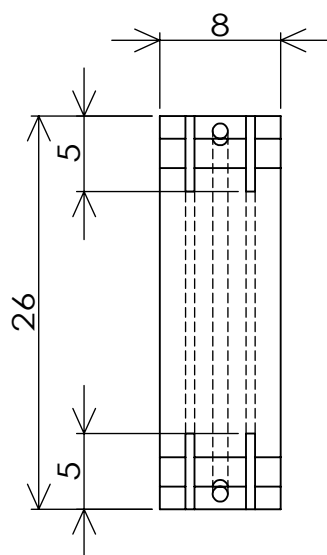
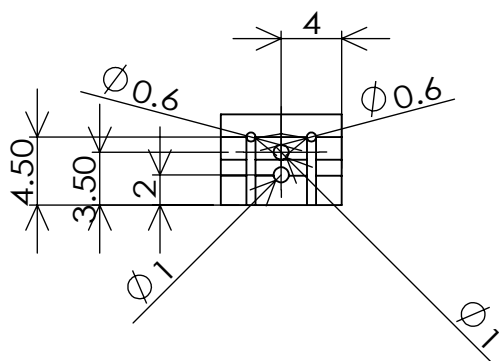
作成者	部品名	
高澤 駿介	中指PIPリンク	
材料	投影法	部品番号
ABS樹脂		P-025



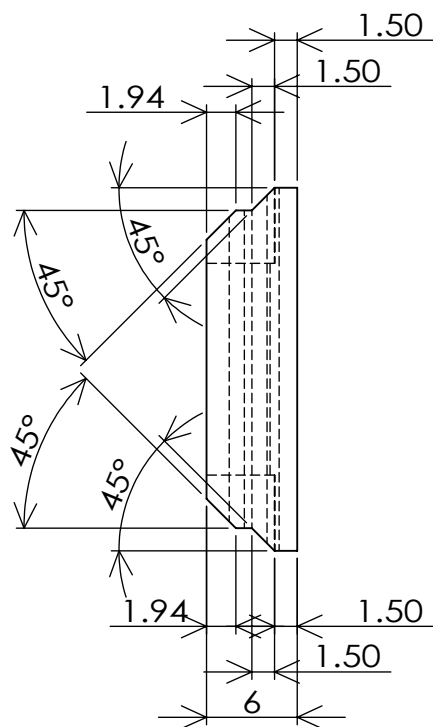
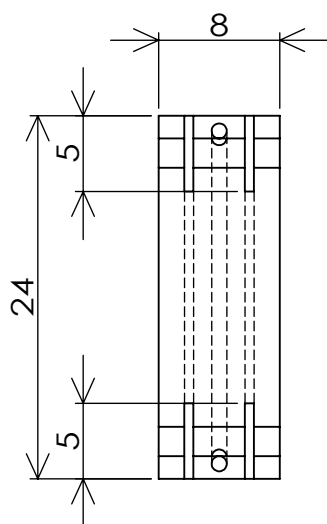
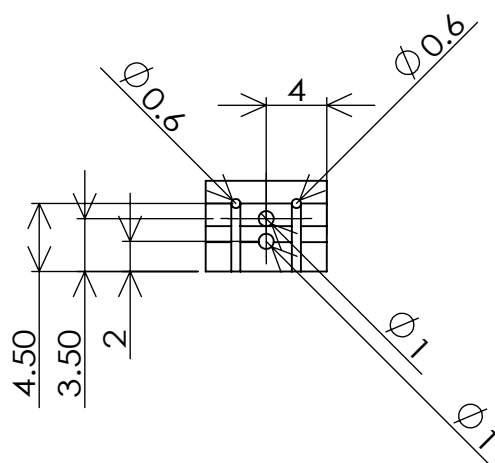
作成者	部品名		
高澤 駿介	中指DIPリンク		
比率	材料	投影法	部品番号
5:1	ABS樹脂		P-026



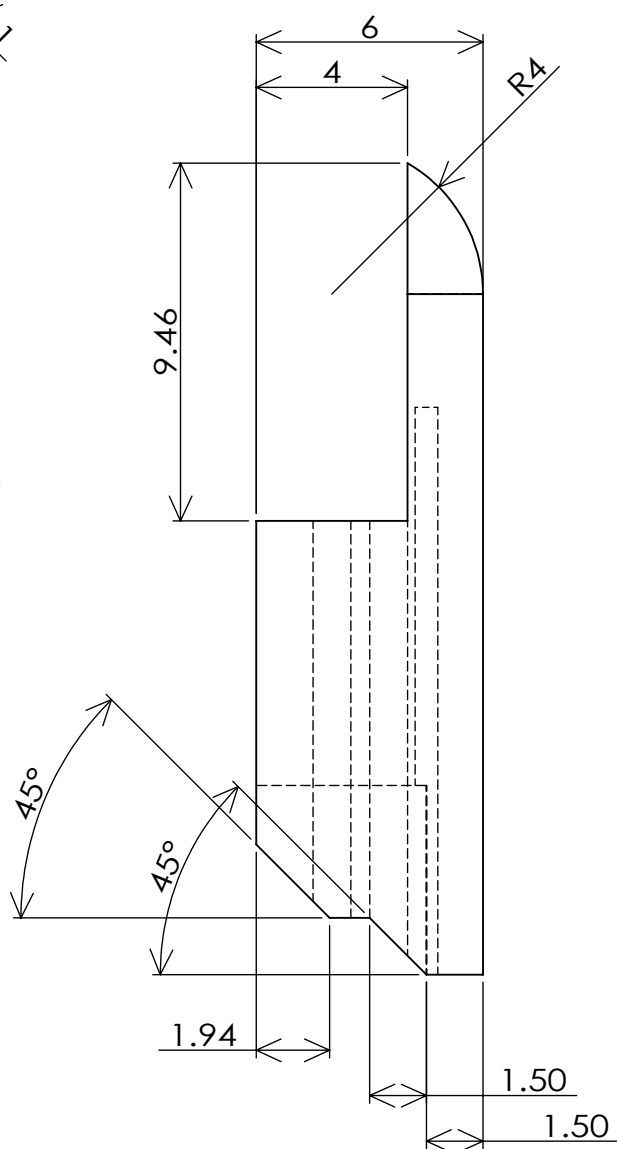
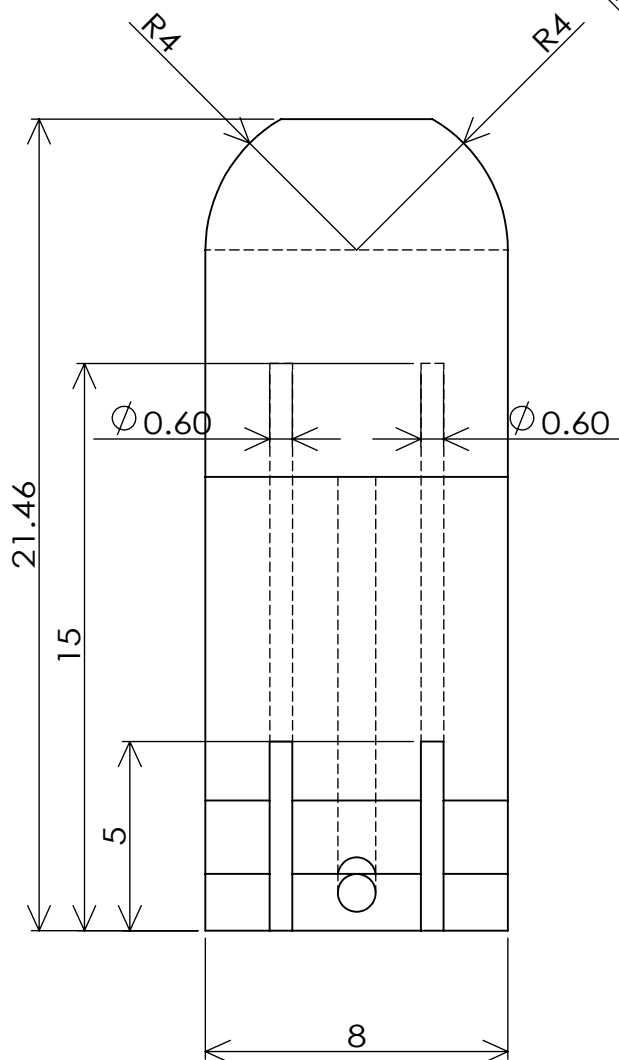
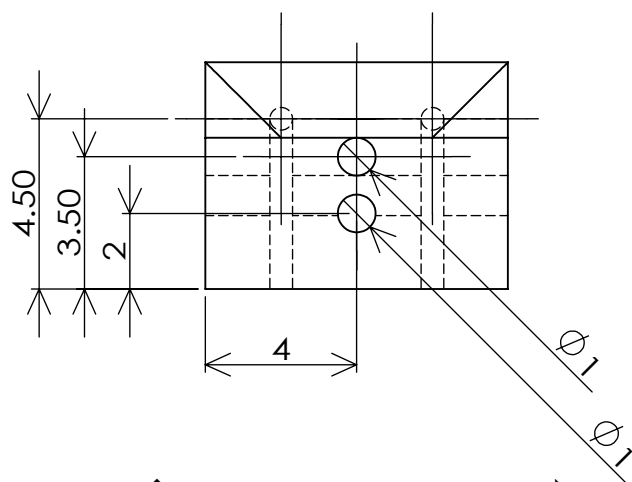
作成者	部品名		
高澤 駿介	環指手根パーツ		
比率	材料	投影法	部品番号
5:1	ABS樹脂		P-027



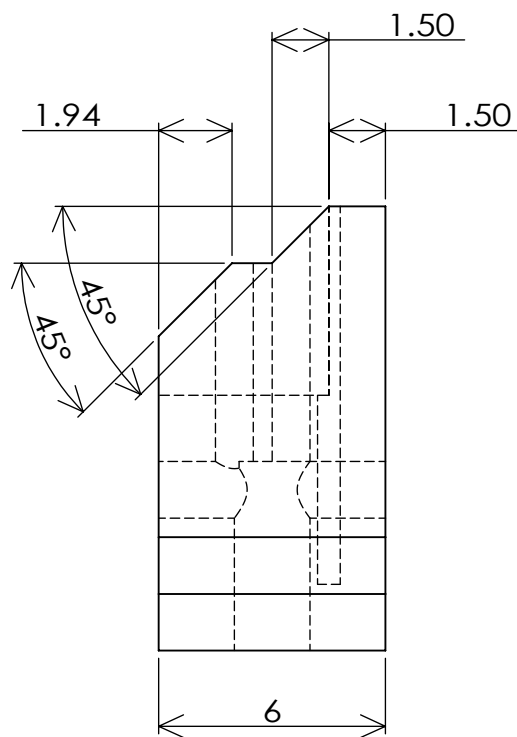
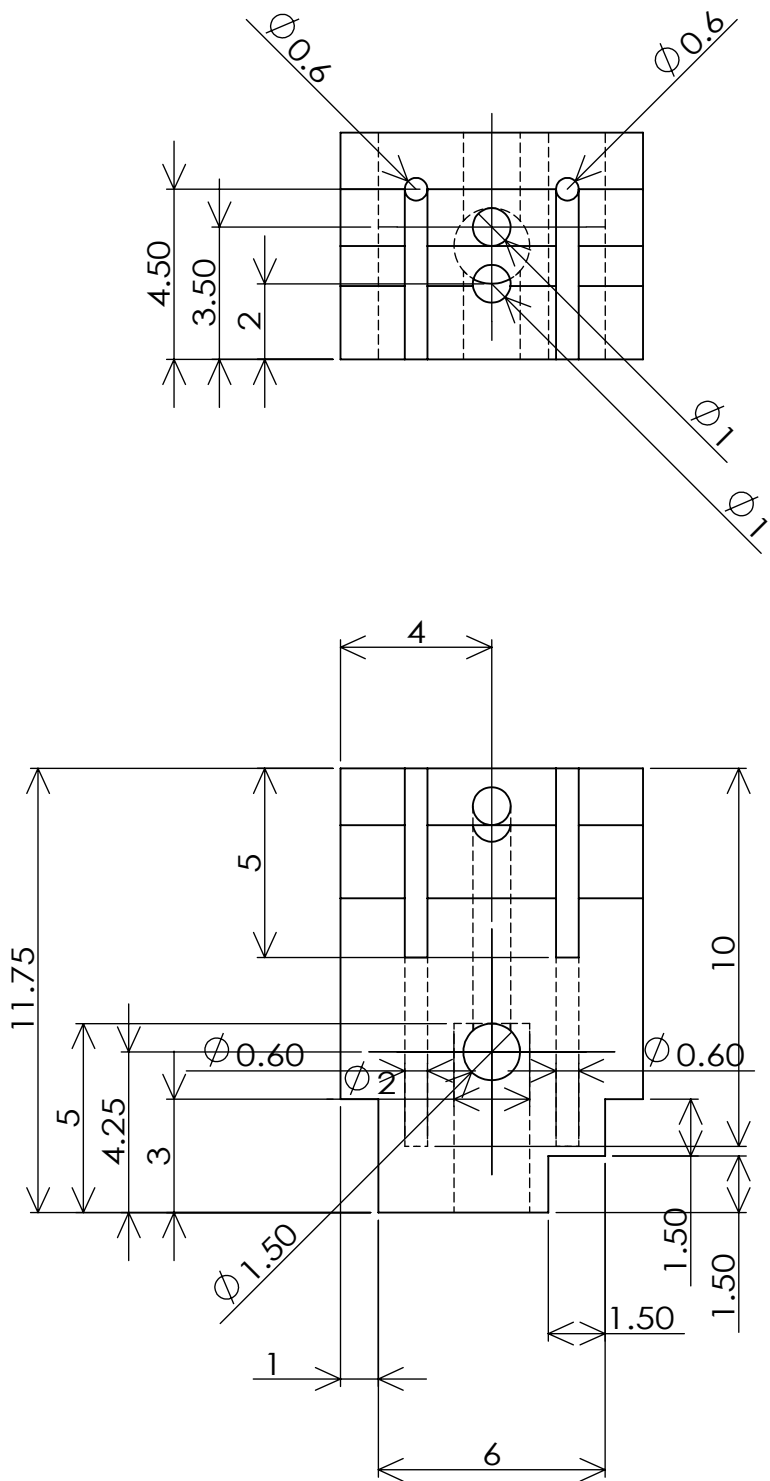
作成者		部品名	
高澤 駿介		環指MPリンク	
比率	材料	投影法	部品番号
2:1	ABS樹脂		P-028



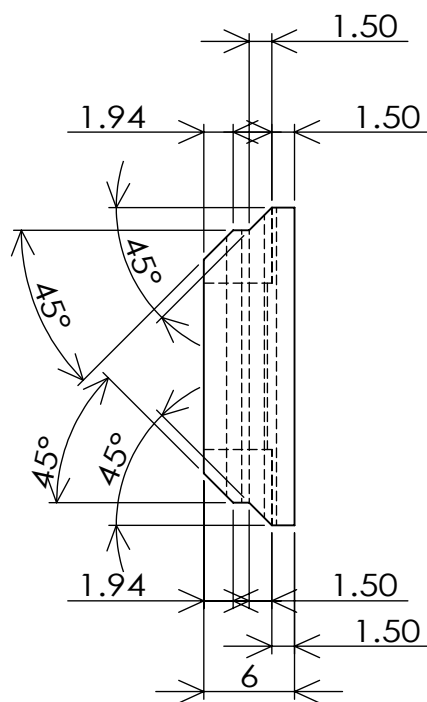
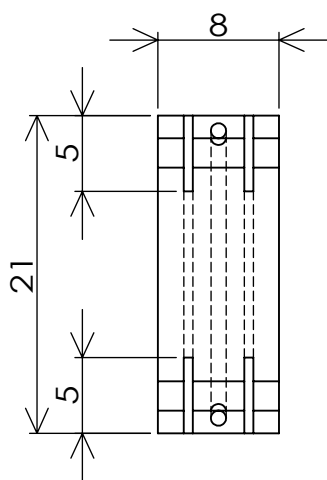
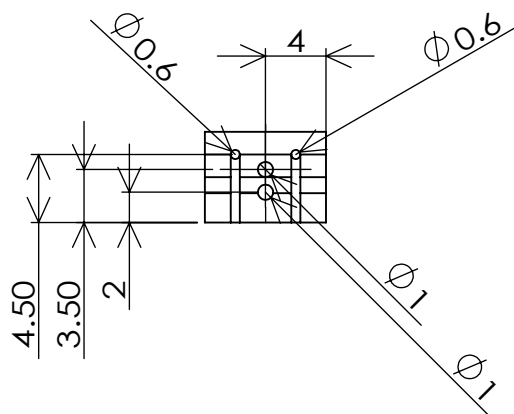
作成者		部品名	
高澤 駿介		環指PIPリンク	
比率	材料	投影法	部品番号
2:1	ABS樹脂		P-029



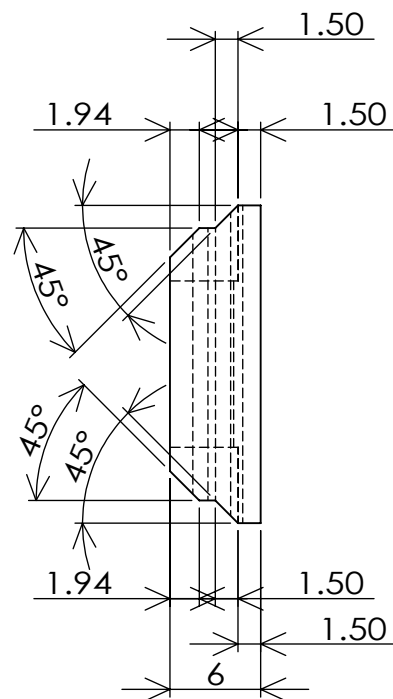
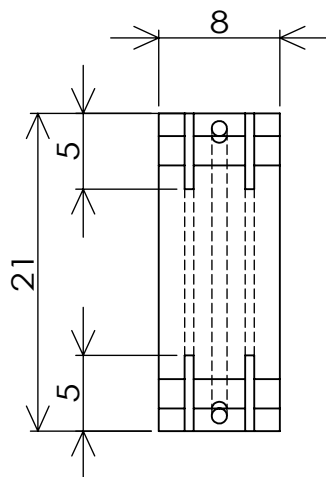
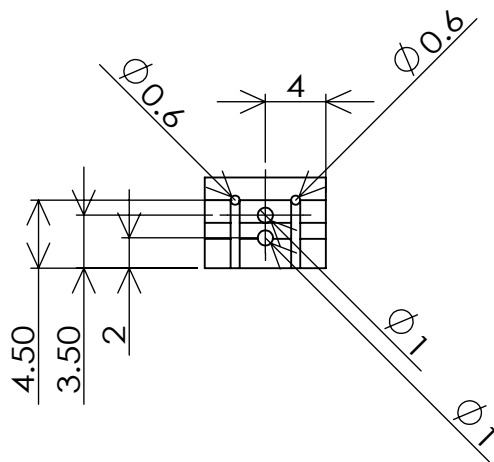
作成者	部品名		
高澤 駿介	環指DIPリンク		
比率	材料	投影法	部品番号
5:1	ABS樹脂		P-030



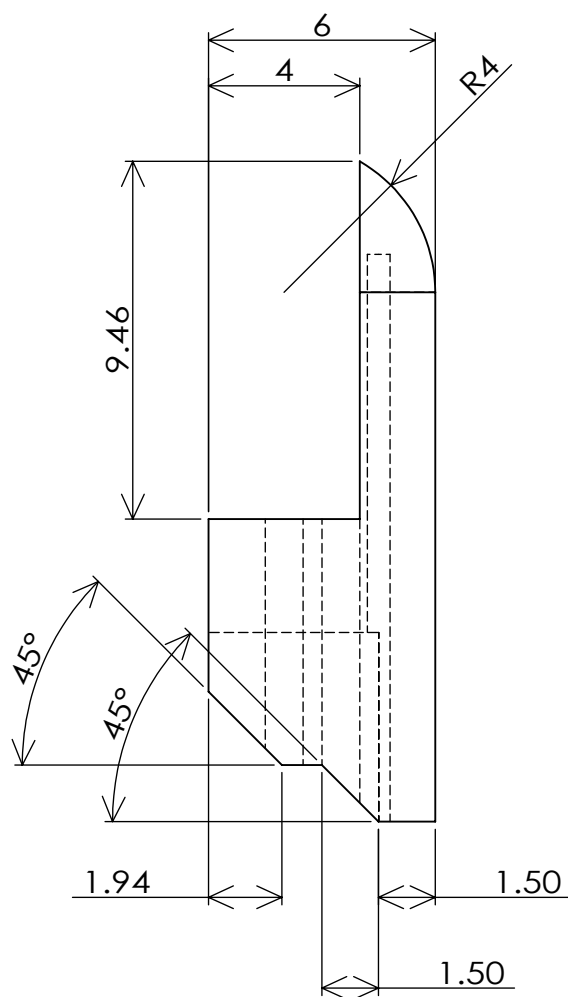
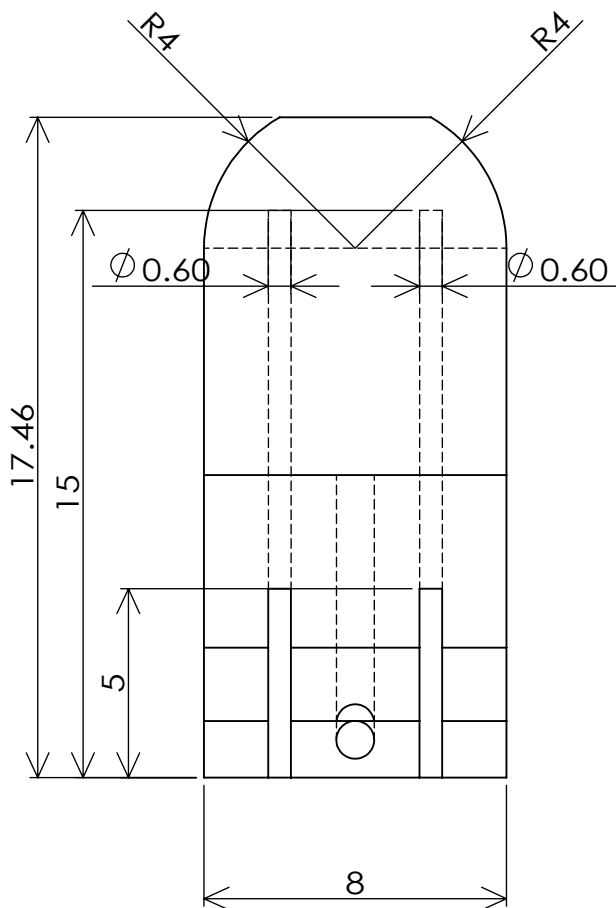
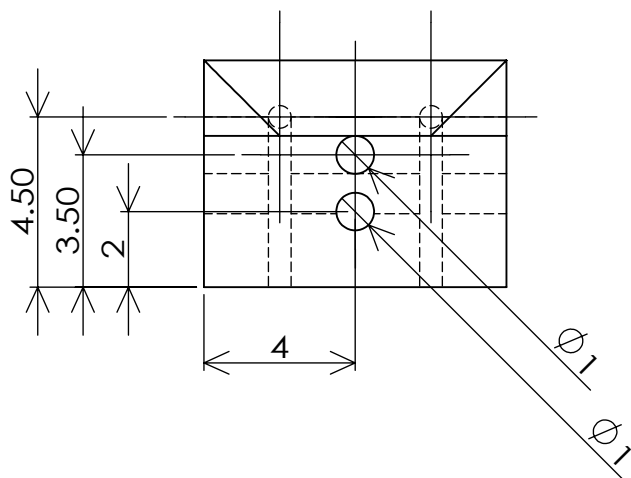
作成者		部品名	
高澤 駿介		小指手根パーツ	
比率	材料	投影法	部品番号
5:1	ABS樹脂		P-031

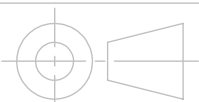


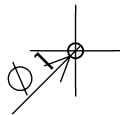
作成者	部品名		
高澤 駿介	小指MPリンク		
比率	材料	投影法	部品番号
2:1	ABS樹脂		P-032



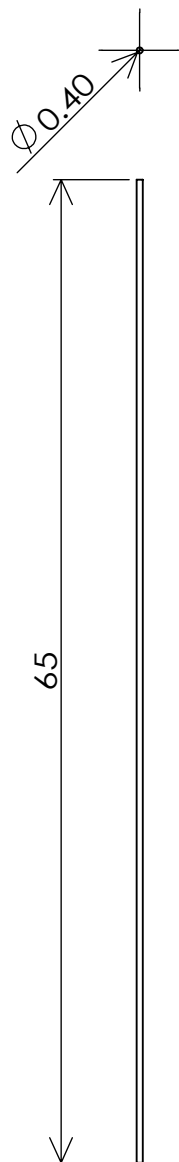
作成者	部品名		
高澤 駿介	小指PIPリンク		
比率	材料	投影法	部品番号
2:1	ABS樹脂		P-033



作成者		部品名	
高澤 駿介		小指DIPリンク	
比率	材料	投影法	部品番号
5:1	ABS樹脂		P-034



作成者		部品名	
高澤 駿介		フォースリミッタ線材	
比率	材料	投影法	部品番号
2:1	超弾性合金		P-035



作成者		部品名	
高澤 駿介		環指・小指用線材	
比率	材料	投影法	部品番号
2:1	超弾性合金		P-036
